

Laboratorní úlohy s časovačem NE 555

Laboratory Tasks with Timer NE 555

Martin Boháč

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Václav Sládeček, Ph. D.

Ostrava, 2021

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá porovnáním základních vlastností bipolárního a CMOS časovače vycházejících z báze NE 555. Práce rovněž poskytuje náhled na zahraniční i domácí nabídku zmíněných časovačů. V jedné z částí této práce byl vysvětlen princip funkce elementárních zapojení DC/DC měničů, ze kterých vychází část realizační. Pro vybrané časovače z české distribuce byly přesně změřeny jejich parametry a srovnány s katalogovými. Konečnou částí je realizace DC/DC měničů napětí s konkrétním časovačem použitým v předchozím měření. Práce se v této části zabývá návrhem zvyšujícího a snižujícího měniče napětí. Funkce jednotlivých zapojení jsou ověřeny pomocí zatěžovacích charakteristik měřené pro různé střídy spínání.

Klíčová slova

Časovač 555, NE 555, vlastnosti, měnič napětí, zvyšující měnič, snižující měnič, DC/DC měnič

Abstract

This bachelor thesis deals with the comparison of the basic properties of bipolar and CMOS timers based on the NE 555 base. The work also provides an insight into the foreign and domestic offer of these timers. In the next part, the principle of operation of the elementary connections of DC/DC converters was explained, from which the implementation part is based. For selected timers from the Czech distribution, their parameters were accurately measured and compared with catalog ones. The final part is the implementation of DC/DC voltage converters with a specific timer used in the previous measurement. The work in this part deals with the design of step-up and step-down voltage converters. The function of the individual circuits is verified by means of load characteristics measured for different switching cycles.

Keywords

Timer 555, NE 555, properties, voltage converter, boost converter, buck converter, DC/DC converter

Obsah

Seznam použitých symbolů	6
Seznam použitých zkratk	7
Seznam tabulek	7
Seznam ilustrací.....	8
Úvod	9
1. Časovač 555	10
1.1 Rozbor zapojení a funkce časovače	10
1.2 Zapojení astabilního multivibrátoru	11
2. Rozbor struktury bipolárních a CMOS časovačů	13
2.1 Varianty časovače 555	13
2.1.1 Bipolární časovač	13
2.1.2 CMOS časovač	13
2.2 TTL	14
2.3 CMOS	16
2.4 Srovnání technologií TTL a CMOS	18
3. Aktuálně dostupné časovače 555	21
3.1 Parametry časovačů 555	21
3.2 Texas Instruments	22
3.3 Maxim Integrated	23
3.4 ON Semiconductor	23
3.5 Časovače dostupné z distribuce GM electronic	24
3.5.1 Časovač NE555P	24
3.5.2 Časovač SA555P	24
3.5.3 Časovač TLC555IP	24
3.5.4 Časovač ICM7555IPAZ	24
4. Základy DC/DC měničů	25
4.1 Měniče bez galvanického oddělení	25
4.2 Měniče s galvanickým oddělením	29
5. Měření parametrů časovačů 555	30
5.1 Měření bipolárních časovačů	30
5.1.1 Časovač NE555P	30
5.1.2 Časovač SA555P	31
5.1.3 Vyhodnocení výsledků měření bipolárních časovačů	31
5.2 Měření CMOS časovačů	32

5.2.1 Časovač TLC555IP	32
5.2.2 Časovač ICM7555IPAZ	32
5.1.3 Vyhodnocení výsledků měření CMOS časovačů.....	33
6. Realizace vzorků měničů napětí.....	34
6.1 Použité hodnoty časovacích prvků	34
6.2 Realizace zvyšujícího měniče	34
6.2.1 Schéma zapojení.....	34
6.2.2 Princip funkce realizovaného měniče	34
6.2.3 Volba komponent a výstupního napětí.....	35
6.2.4 Grafy – zvyšující měnič	37
6.2.5 Shrnutí dosažených výsledků – zvyšující měnič	38
6.2 Realizace snižujícího měniče	38
6.2.1 Schéma zapojení.....	38
6.2.2 Princip funkce realizovaného měniče	39
6.2.3 Volba komponent a výstupního napětí.....	39
6.2.4 Grafy – snižující měnič.....	40
6.2.5 Shrnutí dosažených výsledků – snižující měnič	41
Závěr	42
Použitá literatura a reference	43

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
C	F	Kapacita
D	%	Střída
I⁺	A	Spotřeba proudu udávaná katalogem
I_{OH}	A	Proud source
I_{OL}	A	Proud sink
I_{CCOL}	A	Napájecí proud při nízkém stavu
I_{CCOH}	A	Napájecí proud při vysokém stavu
L	H	Vlastní indukčnost
P₂	W	Výstupní výkon
U_{CC}	V	Napájecí napětí
U_{OH}	V	Napětí ve vysokém stavu
U_{OL}	V	Napětí v nízkém stavu
U_{Lon}	V	Napětí na cívce při sepnutém tranzistoru
U_{Loff}	V	Napětí na cívce při rozepnutém tranzistoru
U_{CCMIN}	V	Minimální napájecí napětí
U_{IN}	V	Vstupní napětí
U_{OUT}	V	Výstupní napětí
U_o	V	Výstupní napětí
f	Hz	Frekvence
f_{MAX}	F	Maximální oscilační frekvence udávaná katalogem
t_F	s	Doba sestupné hrany
t_R	s	Doba nástupné hrany
η	%	Účinnost

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
THT	Through-hole technology – osazování součástkami s drátovými vývody
SMD	Surface mount device – součástka pro povrchovou montáž
PWM	Pulse width modulation – pulzní šířková modulace
TTL	Transistor–transistor–logic – tranzistorově–tranzistorová–logika
CMOS	Complementary metal oxide semiconductor – technologie využívající MOSFET
MOSFET	Metal oxide semiconductor field effect transistor – tranzistor řízený polem

Seznam ilustrací a seznam tabulek

Číslo tabulky	Název tabulky	Číslo stránky
1	Shrnutí vlastností časovačů 555	20
2	Pouzdra časovačů 555	21
3	Dostupné časovače výrobce Texas Instruments	22
4	Dostupné časovače výrobce Maxim Integrated	23
5	Dostupné časovače výrobce ON Semiconductor	23
6	Katalogové hodnoty pro xx555P	30
7	Naměřené hodnoty pro NE555P	30
8	Naměřené hodnoty pro SA555P	31
9	Katalogové hodnoty pro TLC555I P	32
10	Naměřené hodnoty pro TLC555I P	32
11	Katalogové hodnoty pro ICM7555IPAZ	32
12	Naměřené hodnoty pro ICM7555IPAZ	33
13	Použité hodnoty časovacích prvků pro astabilní režim	34

Číslo ilustrace	Název ilustrace	Číslo stránky
1	Vnitřní blokové zapojení časovače 555	11
2	Zapojení časovače v režimu astabilního multivibrátoru	11
3	Vnitřní struktura NPN bipolárního tranzistoru a jeho schématická značka	13
4	Vnitřní struktura MOSFET tranzistoru a schématická značka NMOSFET s vodivým kanálem	13
5	Vnitřní zapojení TTL hradla NAND	14
6	Příklad zapojení TTL hradla NAND s otevřeným kolektorem	15
7	Převodní charakteristika TTL invertoru	15
8	Funkce invertoru realizovaná tranzistorem NMOS; Tranzistor – rozepnut (A), sepnut (B)	16
9	Funkce invertoru realizovaná tranzistorem PMOS; Tranzistor – rozepnut (A), sepnut (B)	17
10	CMOS invertor (vlevo) a jeho převodní charakteristika (vpravo)	18
11	Odběr proudu ze zdroje při překlopení výstupní úrovně	19
12	Zvyšující DC/DC měnič: tranzistor T sepnut	25
13	Zvyšující DC/DC měnič: tranzistor T rozepnut	26
14	Snižující DC/DC měnič: tranzistor T sepnut	27
15	Snižující DC/DC měnič: tranzistor T rozepnut	27
16	Čukův DC/DC měnič: tranzistor T sepnut	27
17	Čukův DC/DC měnič: tranzistor T rozepnut	28
18	Nábojová pumpa: akumulace energie (vlevo); vybíjení do zátěže (vpravo)	28
19	Akumulační měnič: tranzistor T sepnut	29
20	Akumulační měnič: tranzistor: T rozepnut	29
21	Schéma zapojení zvyšujícího měniče s časovačem TLC555	34
22	Zatěžovací charakteristika zvyšujícího DC/DC měniče	37
23	Graf závislosti účinnosti zvyšujícího DC/DC měniče na výstupním výkonu	37
24	Schéma zapojení snižujícího měniče s časovačem TLC555	38
25	Zatěžovací charakteristika snižujícího DC/DC měniče	40
26	Graf závislosti účinnosti snižujícího DC/DC měniče na výstupním výkonu	40
27	Zatěžovací charakteristika snižujícího DC/DC měniče pro různé střídavy spínání	41

Úvod

Časovač 555 je jednoduchý analogový obvod, který svou konstrukcí umožňuje široká využití. Jelikož byl tento obvod vynalezen před 50 lety, je důležité znát jeho strukturu a vlastnosti pro aktuální využití. První kapitola obsahuje blokovou strukturu časovače 555 s popisem funkcí jednotlivých bloků. Dále je představeno astabilní zapojení časovače, které je mimo jiné použito i jako řídicí část realizovaných měničů napětí.

Druhá část pokračuje v návaznosti na první část. Časovač je zde rozdělen na 2 typy se kterými je možné se setkat v praxi a oba typy jsou detailněji rozebrány s ohledem na jejich vzájemné odlišnosti.

V další části je na časovač pohlíženo z hlediska trhu, což může být vhodné pro někoho, kdo hledá vhodný časovač při nejlepším poměru cena/výkon. Pro časovač jsou zde určeny parametry dle kterých se jednotlivé kusy liší a zároveň je zde prezentován sortiment některých zahraničních výrobců i českých distributorů.

Jelikož se práce zabývá realizací měničů napětí, je jedna z jejich částí věnována vysvětlení a popisu principu funkce základních typů měničů.

Pátá kapitola pojednává o praktickém měření na konkrétních časovačích 555. Měření se zaměřuje zejména na hodnoty, které jsou udávány katalogem. Pro bipolární časovače proběhlo navíc měření maximální oscilační frekvence v astabilním režimu, kterou katalog blíže nespecifikuje.

V poslední části jsou realizovány vzorky měničů napětí za použití časovače 555, aby kritické části měniče. Neodbytnou částí měniče je jeho zpětná vazba a regulace. Jelikož by použití PWM modulace mohlo být složité, nákladné a působilo by jistým nepoměrem vzhledem k jednoduchosti časovače, je zde užito poněkud netradičních, ale snadno realizovatelných metod nastavení výstupního napětí.

1 Časovač 555

Začátkem 70. let 20. století byl vyvinut jeden z nejpopulárnějších integrovaných obvodů bipolárního období. Jedná se o časovač, nesoucí název NE555. Tento integrovaný obvod byl vyvinut za účelem generování pravoúhlých signálů, ale ani jeho výrobce nemohl předvídat, jak úspěšným obvodem se nakonec stane. I po několika desetiletích se stále nacházejí nová využití a zapojení tohoto obvodu. O jeho všestranném využití svědčí i to, že s pokrokem a miniaturizací v elektronice získal svou SMD verzi. V dnešní době je využíván jako časovač, generátor signálů, měřič součástí, zpožďovací člen, dělič frekvence, modulátor šířky impulsu, sonda a generátor zvuků, to ale nejsou zdaleka všechny možnosti jeho využití.[1]

1.1 Rozbor zapojení a funkce časovače

Principiální blokové schéma časovače 555 je zobrazeno na obr. 1. Toto schéma představuje zjednodušenou stavbu vnitřní struktury časovače 555. Blokové schéma časovače můžeme rozdělit na 5 základních částí:

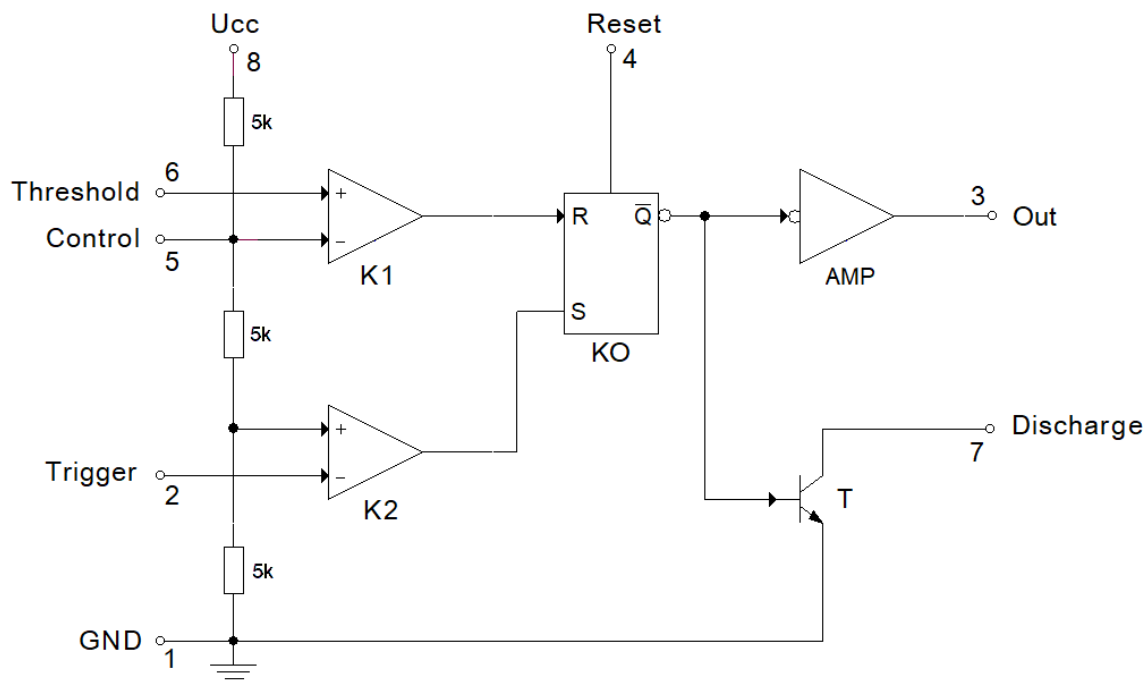
- Napěťový dělič
- Dvojici komparátorů
- RS klopný obvod
- Výstupní výkonový stupeň
- Vybíjecí tranzistor

První částí je napěťový dělič který je zapojen mezi piny 1 a 8. Napětí které je přivedeno na tyto vývody je bez zapojení vnějších obvodů vždy rozděleno poměrem odporů na $1/3 U_{cc}$ a $2/3 U_{cc}$. Tyto hladiny referenčních napětí jsou připojeny na vstupy komparátorů.

Napětí $2/3 U_{cc}$ je spojeno s invertujícím vstupem komparátoru K1 a $1/3 U_{cc}$ s neinvertujícím vstupem komparátoru K2. Komparátor je elektronický obvod který porovnává analogové hodnoty napětí na svých vstupech. Pokud je hodnota na jeho neinvertujícím vstupu (+) větší než na invertujícím (-) , jeho výstup se překlápí do log. 1. Naopak pokud napětí invertujícího vstupu je větší než neinvertující vstupní napětí, výstupem bude log. 0.

Výstupy komparátorů jsou připojeny na vstup klopného obvodu. Klopný obvod má dva vstupy R a S, výstup Q a jeho negaci \bar{Q} . Výstup Q je nezapojen a je ve schématu vynechán. Pokud na vstup S přivedeme 1, výstup Q se překlápí do 1. Pokud na vstup R přivedeme 1, výstup Q se překlápí do 0. Tímto je v časovači vytvořena hystereze.

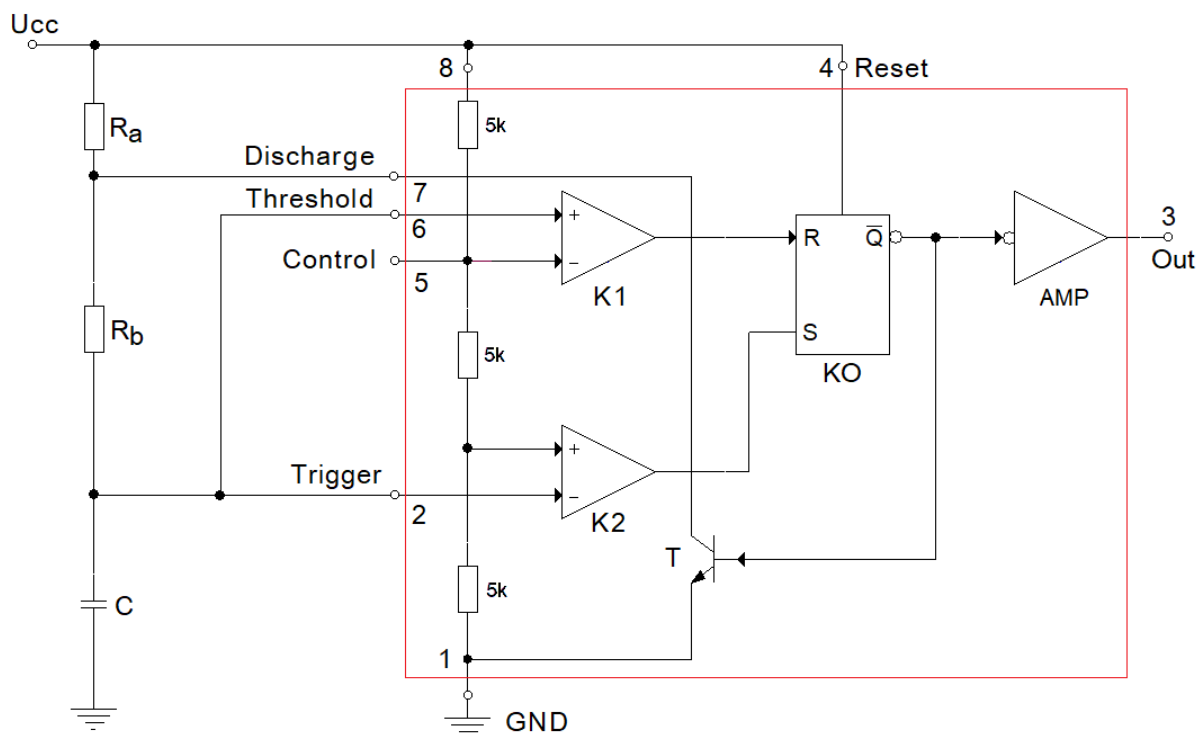
Klopný obvod má navíc možnost úplného nulování vývodem reset. Výstup klopného obvodu je připojen na výkonový stupeň, který umožňuje proudovou zatížitelnost výstupu out. Dále je výstup klopného obvodu sdílen s řízením tranzistoru T, jehož sepnutí má za následek vybití, tedy přizemnění vývodu discharge.[1]



Obr. 1 Vnitřní blokové zapojení časovače 555

1.2 Zapojení astabilního multivibrátoru

V režimu astabilního multivibrátoru slouží časovač pro generování impulzů o určité frekvenci. Pojem astabilní znamená, že jeho výstup není stabilní a osciluje. Tímto se rozumí překlápění mezi vysokým a nízkým stavem. Zapojení je tvořeno časovačem 555, 2 rezistory a kondenzátorem.



Obr. 2 Zapojení časovače v režimu astabilního multivibrátoru

K časovači je připojeno externí zapojení rezistor R_a a R_b , přes které se nabíjí kondenzátor C. Napětí na kondenzátoru je přivedeno na vývod trigger a threshold. Kondenzátor se nabíjí tak dlouho dokud nedosáhne napětí $2/3 U_{cc}$. V tento moment se změní výstup komparátoru K1 a RS klopný obvod se překlopí do nízkého stavu. Invertovaný výstup klopného obvodu v tento okamžik aktivuje vybíjecí tranzistor T a začne skrze odpor R_b vybíjet kondenzátor C. Kondenzátor se vybíjí tak dlouho dokud jeho napětí nepoklesne na hodnotu $1/3 U_{cc}$, kdy komparátor K2 nastaví výstup klopného obvodu do log. 1. Tímto se uzavře tranzistor T a cyklus se začne opakovat.

Nabíjení kapacity závisí na odporech R_a a R_b a proto je zpravidla delší než doba vybíjení. Při nabíjení je výstup ve vysokém stavu a pro dobu nabíjení platí že:

$$t_1 = 0,693 \cdot (R_a + R_b) \cdot C \quad (1)$$

Vybíjení probíhá skrze odpor R_b a platí

$$t_2 = 0,693 \cdot R_b \cdot C \quad (2)$$

Celková doba periody se skládá ze součtu dob nabíjení t_1 a vybíjení t_2 .

$$T = t_1 + t_2 = 0,693 \cdot (R_a + 2R_b) \cdot C \quad (3)$$

Kde t_1 je doba nabíjení kondenzátoru C $[t_1] = s$,
 t_2 je doba vybíjení kondenzátoru C $[t_2] = s$,
 T je doba periody výstupního signálu $[T] = s$,
 C je kapacita kondenzátoru $[C] = F$,
 R_a je hodnota nabíjecího odporu $[R_a] = \Omega$,
 R_b je hodnota vybíjecího odporu $[R_b] = \Omega$.

Doba nabíjení platí však pouze pro stálý chod a né počáteční zapnutí. Při zapnutí napájení obvodu je první nabíjecí puls delší než v ustáleném chodu. Kondenzátor C se totiž nabíjí od 0 do $1/3 U_{cc}$ a poté už jen mezi hodnotami $1/3 - 2/3 U_{cc}$.

2 Rozbor struktury bipolárních a unipolárních časovačů

V dnešní době existuje široká nabídka časovačů na bázi NE555. Pro efektivní využití potenciálu, který nabízí daný časovač, je kritické znát jeho bližší vlastnosti které se odvíjí od jeho struktury. Jelikož všechny variace časovače vychází ze stejné báze, jejich funkčnost je principiálně stejná. Jednotlivé varianty se od sebe liší technologií výroby tranzistorové logiky integrovaného obvodu.

Digitální logická rodina je skupina kompatibilních stavebních bloků které mají vstupy a výstupy. Tyto bloky vykonávají jednoduché logické operace, mohou tvořit funkce nebo se rozhodovat dle předchozího stavu. Kompatibilitou se rozumí stejné elektrické vlastnosti které musí platit pro každý takto realizovaný obvod stejné rodiny.[2]

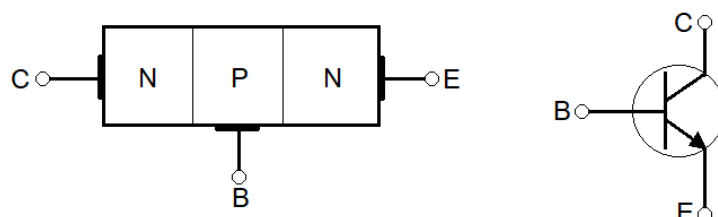
2.1 Varianty časovače 555

Časovače 555 se dělí na 2 základní typy dle jejich konstrukce. V praxi se dá setkat s těmito rozdílnými variantami:

- Bipolární časovač
- CMOS časovač

2.1.1 Bipolární časovač

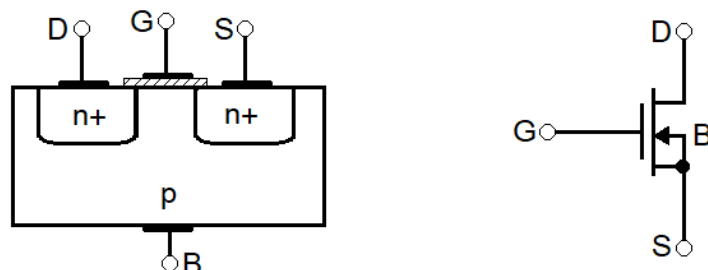
Základním konstrukčním prvkem bipolárních časovačů je bipolární tranzistor. Bipolární tranzistor je polovodičový spínač, skládající se ze dvou PN přechodů. Vhodným zapojením tohoto spínače se může kontrolovat velikost protékajícího kolektorového proudu, několikanásobně menším bázevým proudem. Struktura bipolárního časovače se skládá primárně z bipolárních tranzistorů a je tedy ovládána proudem. Tato skutečnost má za následek jednotlivé vlastnosti.



Obr. 3 Vnitřní struktura NPN bipolárního tranzistoru a jeho schématická značka

2.1.2 CMOS časovač

Základním konstrukčním prvkem CMOS časovačů jsou tranzistory typu MOSFET. U tranzistorů typu MOSFET, je vodivost kanálu mezi elektrodami D a S řízena napětím na elektrodě Gate. Tranzistory MOSFET jsou na rozdíl od bipolárních tranzistorů řízeny elektrickým polem.

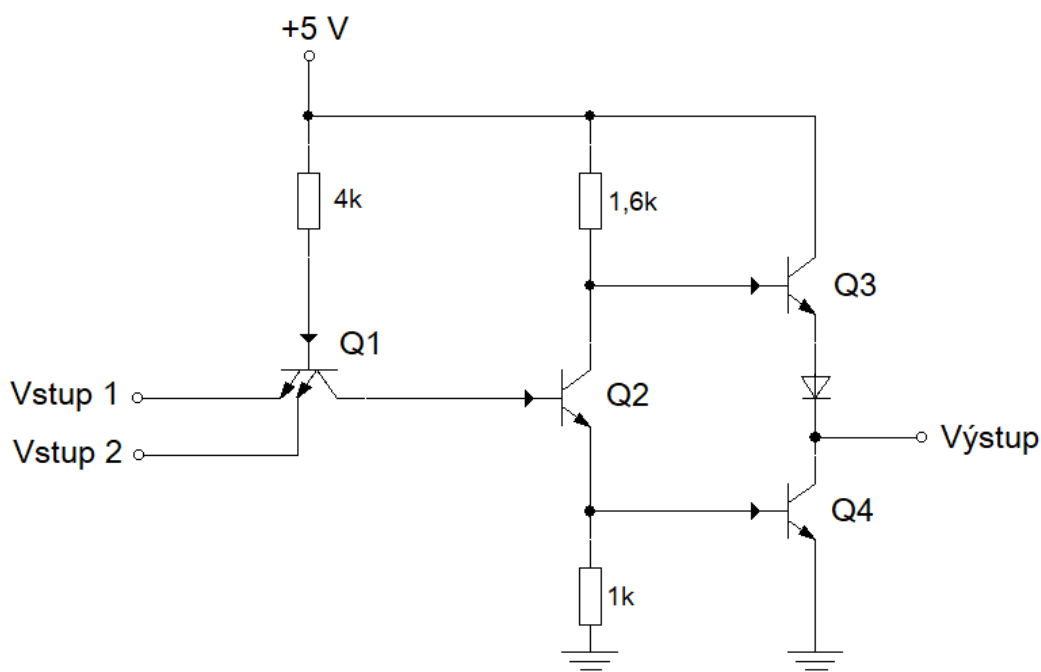


Obr. 4 Vnitřní struktura MOSFET tranzistoru a schématická značka NMOSFET s vodivým kanálem

2.2 TTL

TTL (Transistor-Transistor-Logic) je logika realizovaná pomocí bipolárních tranzistorů. Vyznačuje se nízkou cenou, vysokou rychlostí (20-125 MHz), relativní odolností proti šumu a úctyhodnou zatížitelností svých výstupů.[2] Rodina TTL má celou řadu podkategorií, které na úkor rychlosti, výkonu či složitosti zlepšují její vlastnosti v určitém směru. Dnes se jedná už o poměrně zastaralou logiku. Princip funkce je vysvětlen na typickém hradle NAND.

Na Obr. 3 je vnitřní schéma logického bloku funkce NAND. Toto hradlo vykonává funkci negace logického součinu. S dostatečně velkým počtem těchto konstrukčních bloků lze realizovat i většina obvodů v TTL.



Obr. 5 Vnitřní zapojení TTL hradla NAND.

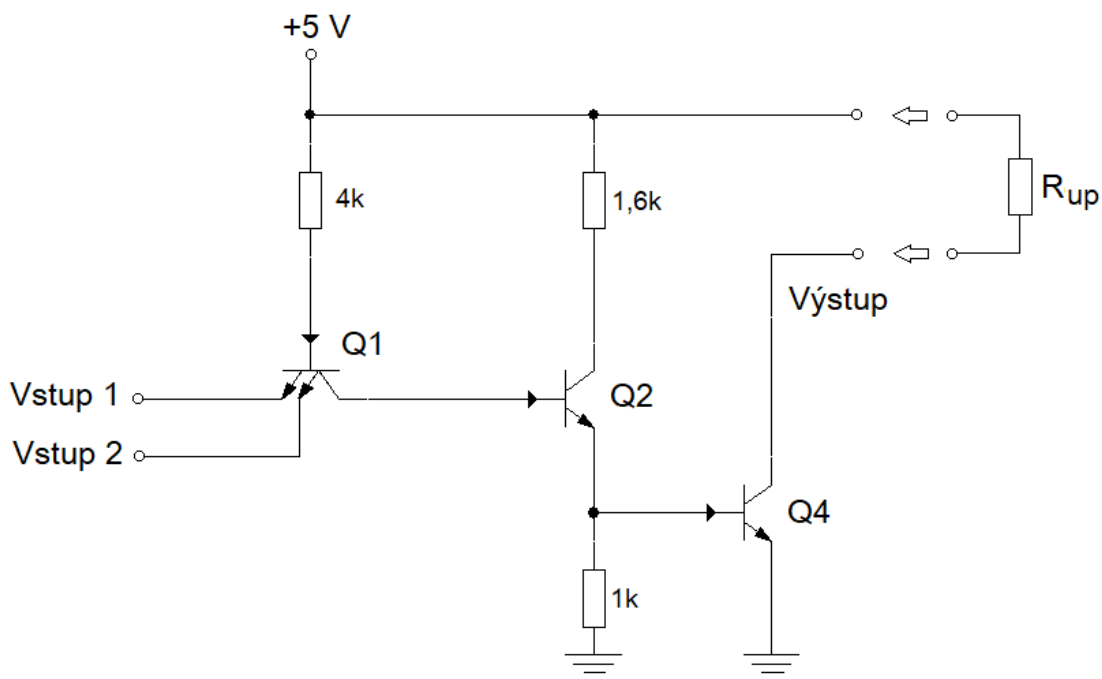
Předpokládejme že není připojen žádný vstup. Ani jedním z vývodů emitoru tranzistoru Q1 neteče proud. Přechod báze–kolektor je v propustném směru a proud teče od zdroje +5 V skrze diodu přechodu do báze Q2 který se sepne. Tímto se sepne tranzistor Q4 a uzavře Q3. Tranzistor Q4 pak bude tvořit cestu uzemňovacímu proudu od výstupu. Při těchto podmínkách může z výstupu téct do země značný uzemňovací proud.

Pokud připojíme oba vstupy do napětí odpovídající logické 1, svody emitorů tranzistoru Q1 neteče žádný proud. To je důvod proč by se vstupy TTL obvodů neměly nechávat nepřipojeny. Při obou vstupech v logické 1, je výstup v logické 0.

Pokud jeden nebo oba vstupy připojíme k logické 0, Q1 se chová jaké tranzistor a proud poteče skrze přechod báze–emitor. Tranzistor Q2 se rozezne a Q4 zůstane vypnutý. Na výstupu bude napětí přibližně 3,3 V, protože rezistor 1,6k, přechod B-E a dioda nám vytvoří úbytek napětí.[2]

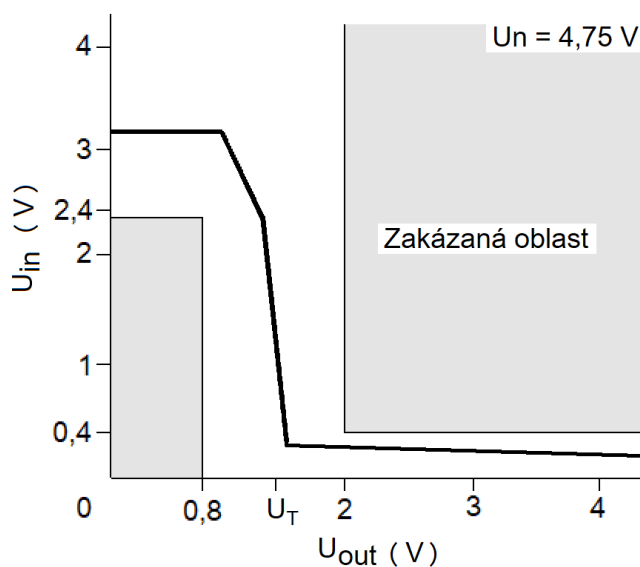
Toto uspořádání výstupních tranzistorů Q3 a Q4 se nazývá totemové pole. Z tohoto zapojení pramení vysoká rychlost logické rodiny TTL. Jeden tranzistor slouží pro překlopení výstupu do vysokého stavu a druhý ho přivádí do nízkého. Dané zapojení má výhodou předem zmíněné rychlosti ale může značně zatěžovat napájecí zdroj.

Druhým možným uspořádáním výstupu je zapojení s otevřeným kolektorem. Z tohoto zapojení lze odvodit, že tranzistor je používán primárně pro stahování výstupu k zemi. Jeho výhodou je, že může být paralelně spojen s dalšími výstupy. Obvod s takovýmto výstupem musí být doplněn o externí rezistor, který zajistí překlopení výstupu do vysokého stavu. Bez této modifikace by nebyl schopen správně fungovat. Nevýhodou je spotřeba energie tímto rezistorem a snížená spínací frekvence než kterou disponuje totemové pole.



Obr. 6 Příklad zapojení TTL hradla NAND s otevřeným kolektorem

Významnou částí technologie TTL je způsob kterým jsou spínány výkonové výstupy. Pokud je výstup v log. 0 je sepnutý pouze spodní tranzistor a výstup může pojmout velký svodový proud. Při výstupu v log. 1, je aktivní vrchní tranzistor a výstup může zásobovat vnější obvody relativně velkým proudem.



Obr. 7 Převodní charakteristika TTL invertoru

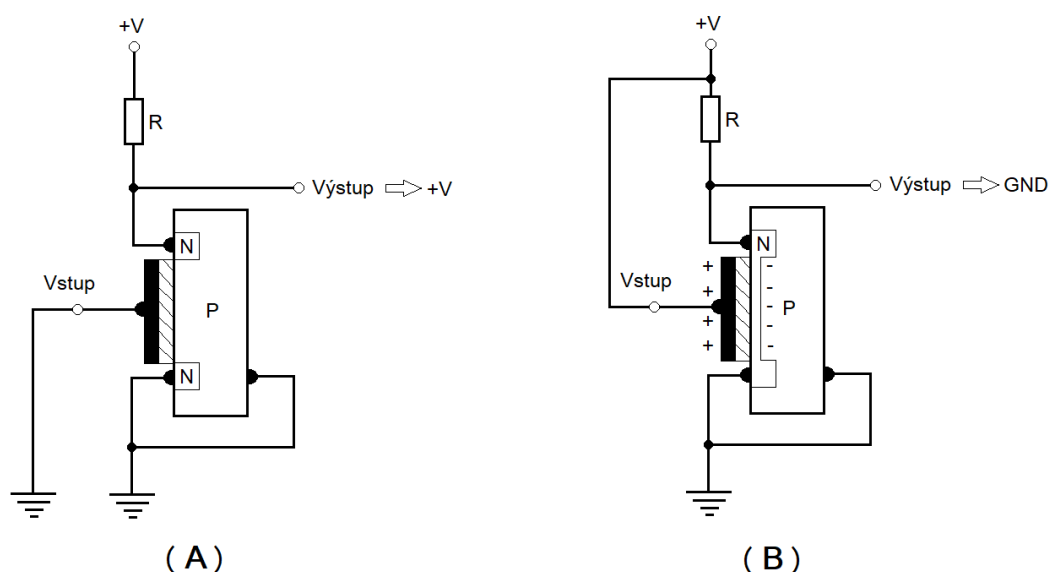
Při změně z log. 0 na 1, nebo naopak, jsou však oba tranzistory na krátký okamžik sepnuty. To má za následek velký nárůst proudu těmito tranzistory. Proudová špička může dosahovat zlomku ampéru a trvat až 10 nanosekund. Pokud nejsou tyto rušivé špičky odfiltrovány, může docházet k problémům ve zbylých obvodech. K filtrování je vhodné použít kondenzátor o kapacitě 0,01–0,1 μF s krátkými vývody každé 4 hradla.[2]

Spojením vstupů 1 a 2 hradla NAND získáme funkci invertoru. Převodní charakteristika nám udává závislost výstupního napětí na vstupním. V charakteristice jsou vyznačeny zakázané oblasti TTL technologie. Jsou to rozsahy pro obě logické úrovně vstupního a výstupního napětí, které musí obvod dodržet. Ve strmé části charakteristiky se nachází bod U_T . V tomto bodě dochází k překlopení logických úrovní. K překlopení dochází, když se vstupní napětí rovná výstupnímu.

2.3 CMOS

CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) je logika realizovaná tranzistory typu MOS. Oproti dřívějším rodinám má CMOS několik důležitých výhod. Napájecí napětí se pohybuje od +3 do 15 V, logické úrovně se mění při polovině napájecího napětí, což zaručuje dobrou odolnost proti rušení, vstupní obvody mají velkou impedanci, takže je snadné je ovládat a napájecí proud v ustálených stavech je téměř nulový. Tak jako TTL má CMOS celou řadu podkategorií které zlepšují vlastnosti zařízení v jednom směru na úkor ostatních parametrů.

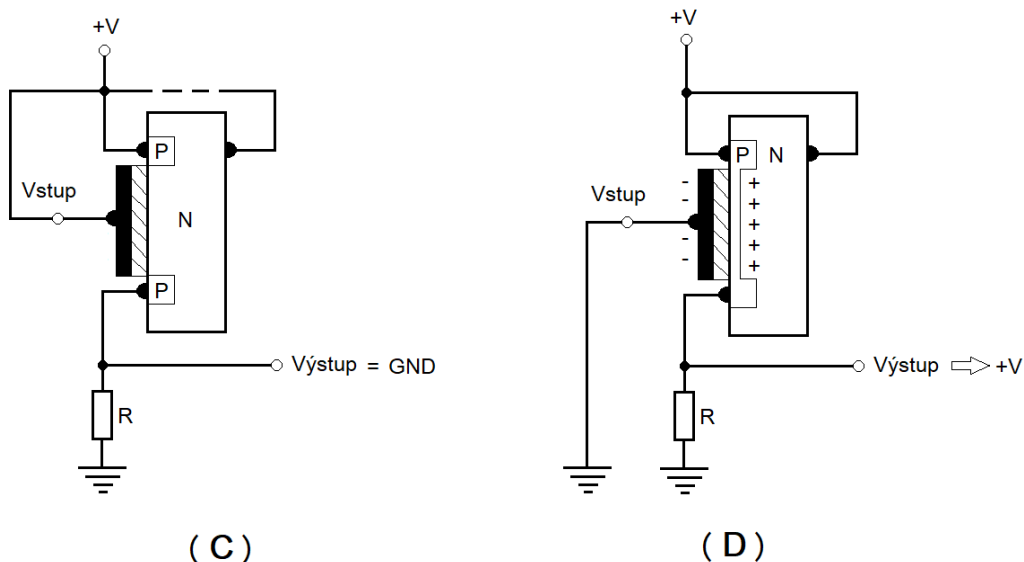
Základním stavebním kamenem technologie CMOS jsou NMOS a PMOS tranzistory. Jedná se o struktury vytvořené na polovodičové destičce u kterých je vodivost kanálu mezi elektrodami drain a source ovládána elektrickým polem vytvořeným elektrodou gate.[3]



Obr. 8 Funkce Invertoru realizovaná tranzistorem NMOS; Tranzistor - rozepnut (A), sepnut (B)

Na Obr. 6 se nachází zapojení s tranzistorem NMOS s obohaceným kanálem plnící funkci invertoru. V části A máme uzemněnou elektrodu gate, substrát typu P a elektrodu source. Na elektrodě drain je přivedeno kladné napětí +V skrze zátěžový odpor R který plní funkci proudového zdroje. Jelikož je gate spojen se zemí, jeho potenciál se rovná potenciálu substrátu a není vytvořeno elektrické pole. Přechod drain-source se chová jako PN přechod v závěrném směru a na výstupu je kladné napětí.

V části B je na gate přivedeno kladné napětí +V. Levá strana gateu tímto získá kladný náboj (díry) a pravá strana se nabije záporným nábojem (volné elektrony). Volné elektrony získá pravá strana substrátu díky spojení se zemí. Substrát byl typu P, tedy obsahoval díry, se vzrůstajícím elektrickým polem a přibývajících elektrony se z něj stane typ N a dojde k vytvoření vodivého kanálu typu N mezi elektrodami drain a source.[3]



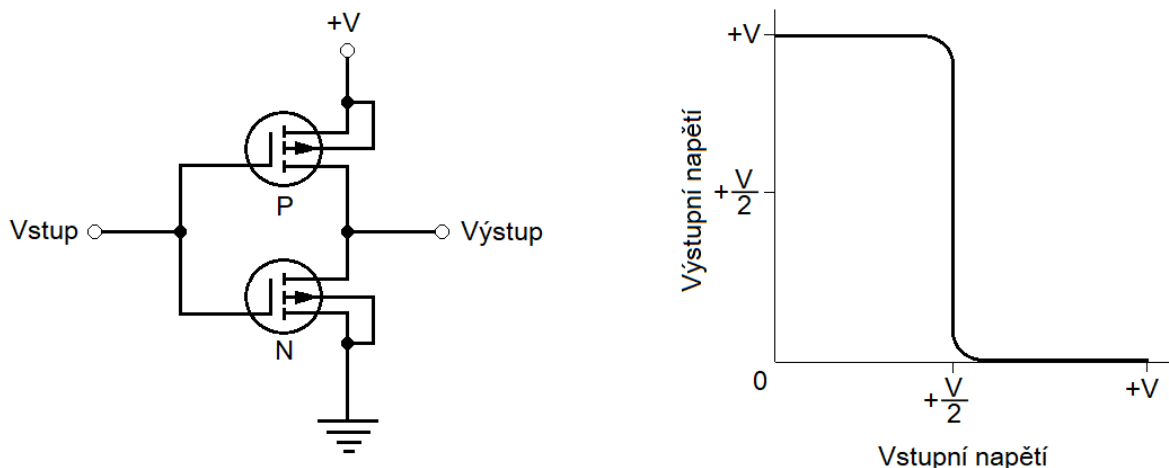
Obr. 9 Funkce Invertoru realizovaná tranzistorem PMOS; Tranzistor - rozeprnut (C), sepnut (D)

Tranzistor PMOS se chová obráceně než NMOS. V části C je PMOS tranzistor v rozeprnutém stavu. Při přivedení kladného napětí na Gate se kondenzátorová struktura nenabije a nedojde k vytvoření vodivého kanálu, protože mezi elektrodou gate a substrátem nevznikne rozdíl potenciálu. Výstupní napětí pak bude odpovídat zemnímu potenciálu.

Při připojení gateu na zem se nyní levá část nabije záporně a pravá kladně. Na pravé straně dojde k nahromadění děr a z N substrátu se vytvoří kanál typu P. Tímto se spojí elektrody drain a source a výstup se přepne do pozitivního napětí.

Obr. 8 představuje skutečné zapojení invertoru pomocí technologie CMOS. V tomto zapojení se pro sebe N a P kanálové tranzistory chovají jako rezistor v předcházejících schématech. Pokud je vstup na potenciálu země, P kanálový tranzistor se sepne a N kanálový tranzistor zůstane rozeprnutý. Výsledkem bude kladné napětí na výstupu. Můžeme si všimnout, že pokud bude v tomto stavu výstup nezatížen, nebude zátěž ze zdroje odebírat žádný proud.

Pokud vstup připojíme ke zdroji +V, P se rozeprne a N sepne. Výsledkem bude log. 0 na výstupu. Výstup bude spojen s potenciálem země skrze tranzistor N a opět nebude odebírán žádný proud. Nejvíce energie hradlo odebírá během překlápění vstupního stavu, protože musí nabíjet vstupní kapacitu. Ve statickém stavu je spotřeba energie téměř nulová.



Obr. 10 CMOS invertor (vlevo) a jeho převodní charakteristika (vpravo)

Na převodní charakteristice můžeme vidět jak se výstup překlápí přesně v polovině napájecího napětí. Díky symetrickému tvaru převodní charakteristiky je zajištěna stejná odolnost proti šumu od napájecího zdroje a zemnicí linky. Převodní charakteristika má zároveň mnohem lepší a strmější tvar v oblasti kolena než charakteristika od technologie TTL.

2.4 Srovnání technologií TTL a CMOS

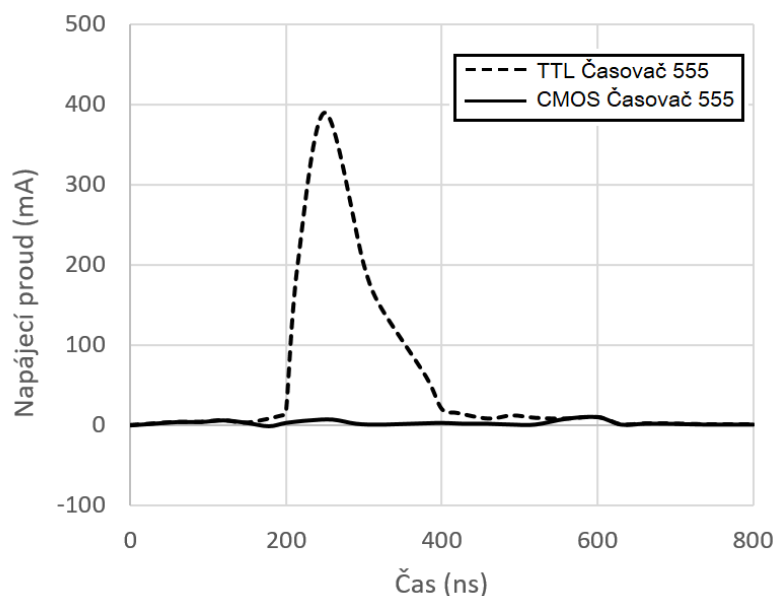
Z hlediska spotřeby energie je hospodárnější technologií CMOS. Vstup TTL technologie je bipolární tranzistor a ten ke svému sepnutí potřebuje určitý proud. Vstup CMOS technologie tvoří kondenzátor, který stačí pouze nabít a tranzistor zůstane sepnutý. Díky tomuto má CMOS technologie v statickém stavu odběr v řádech pikoampér. Ve vysokých spínacích frekvencích je tato vlastnost ale nevýhodou, protože k rychlému sepnutí vstupní kapacity je zapotřebí velký proud.[4]

Výstup TTL je tvořen buďto totemovým polem, nebo tranzistorem s otevřeným kolektorem. Vlivem úbytku napětí na přechodech se pak výstupní napětí nerovná napájecímu. U CMOS technologie výstupní napětí téměř kopíruje napájecí hodnoty. TTL výstup je ale schopen větší proudové zatížitelnosti než výstup CMOS. To má ale i značnou nevýhodu. Na obr. 11 můžeme vidět jak velkým proudovým odběrem zatěžují časovače v dané logické rodině. Obecně tento graf platí i pro jiné integrované obvody než časovače. Z grafu je patrné, že obvody typu TTL mohou být svým dynamickým projevem příčinou kolísání referenčního napětí zdroje a tím způsobovat rušení. U CMOS obvodů se s tímto problémem nesetkáme.

Kvůli menší ploše tranzistorů má technologie CMOS vyšší stupeň integrace než rozměrná TTL. Jistou výhodou TTL oproti CMOS je odolnost obvodu proti elektrostatickému výboji. V obvodech s CMOS technologií, je elektroda gatu oddělena od kanálu tenkou vrstvou oxidu křemičitého. Tloušťka této izolace se pohybuje v jednotkách nanometrů. Při přetížení gatu vysokým napětím, nebo vlivem elektrostatického výboje může dojít k nevratnému poškození této vrstvy a tím destrukci tranzistorové struktury. Nezapojený vývod CMOS může navíc akumulovat náboj a tím vytvářet na vstupu rušení. U TTL vstupu není rozdíl mezi nezapojeným vstupem a vstupem připojeným na kladné napájecí napětí. Tato vlastnost je způsobena přechodem PN vstupního tranzistoru a proto technologie TTL na plovoucí napětí tolik netrpí. Nezapojené vstupy je ale u obou technologií doporučeno ošetřovat.

Je-li napájecí napětí maximálně 5V, je možno obvody CMOS a TTL přímo vzájemně propojovat. Vysoká vstupní impedance obvodu CMOS umožňuje, že hradlo TTL může budit libovolný počet hradel

CMOS, aniž by to mělo negativní vliv na vstupní logickou zátěž ve stavu L. Protože je ale u obvodů TTL úroveň H jen 3,5 V, je nutný přídatný zvedací odpor. Pro zvednutí potenciálu se většinou používá odpor o velikosti 1k až 10k. Tento odpor zajistí že výstupní napětí vzroste na 4,5 V. Pokud je napájecí napětí 5V, může být obvod CMOS použit pro buzení hradla TTL. Je-li napájecí napětí vyšší, není přímé spojení možné a musí být použit meziobvod pro přizpůsobení.[4]



Obr. 11 Odběr proudu ze zdroje při překlopení výstupní úrovně [18]

Obecně lze říci, že obvody CMOS předčily svými vlastnostmi obvody TTL. TTL si však stále najdou své uplatnění v analogových i digitálních aplikacích.

Tabulka 1 Shrnutí vlastností časovačů 555.

Souhrnné porovnání vlastností	
Bipolární časovač 555	CMOS časovač 555
Napájecí napětí	
4,5–18 V	2–18 V
Napájecí proud	
Přibližně 5 mA	V rozmezí 100-300 μ A
Velikost výstupního napětí při napájení 5V	
$U_{OH}=3,5$ V Tato vlastnost se může negativně projevit v jednoduchém zapojení, kde je využíváno výstupního pinu 3 pro nabíjení kondenzátoru.	$U_{OH}=5$ V Výstupní napětí se shoduje s napájecím a proto nedojde k nesymetrickému nabíjení a vybíjení kondenzátoru.
Velikost výstupního proudu	
Pro všechny varianty časovače má výstupní proud na pinu 3 hodnotu ± 200 mA.	Výstupní proudy jsou nižší než u bipolární varianty. Proud v režimu source má hodnotu do 20 mA a v režimu sink do 100 mA.
Zatěžování zdroje	
Při změně stavu na výstupu, dochází k proudovým špičkám odebíraných ze zdroje. Vývod 5 musí být stabilizován kondenzátorem pro nerušený chod.	Změny výstupu nezpůsobují proudové špičky. Stabilizace napětí je proto pouze doporučena. Při velkých kmitočtech se zvyšuje napájecí proud a může se vyrovnat bipolárnímu časovači.
Frekvence v astabilním módu	
Udává se do 100 kHz a nemá specifikaci pro maximální hodnotu.	Relativně větší než u bipolární varianty. Může dosahovat až 3 MHz.
Časové konstanty	
Bipolární časovač má větší závěrné proudy vývodu 6 a 2 které nepříznivě ovlivňují časové konstanty. Pro dosažení nízkých frekvencí je nutný velký kondenzátor.	CMOS časovač má závěrné proudy minimální a proto může být použit s časovacími prvky s velkou impedancí.

3 Aktuálně dostupné časovače 555

Časovače 555 vyrábí velké množství firem a proto nesou napříč trhem různá označení. Název se může lišit dle počtu časovačů v jednom pouzdře, např. NE555 jeden časovač, 556 dva samostatné časovače nebo 557 pro trojnásobný časovač. CMOS časovače bývají často označeny písmeny TLC, CM, TS nebo ICM ale nejedná se o pravidlo. Kvůli vysokému počtu společností zabývajících se výrobou tohoto časovače, bude v této kapitole uveden jen částečný seznam výrobců a aktuálně vyráběných časovačů. Tato kapitola může dát čtenáři přehled o vyráběných typech časovačů a může být použita pro porovnání důležitých parametrů při výběru konkrétního obvodu.

3.1 Parametry časovačů 555

Jak již bylo zmíněno, značení časovačů se nemusí shodovat u všech výrobců. Časovače jsou obvykle pojmenovány a rozděleny do skupin dle svých vlastností. Primárním rozdělením je dle typu použité tranzistorové rodiny, tedy TTL a CMOS. Všechny časovače jsou rozděleny do skupin dle rozsahu pracovních teplot. Rozsahy teplot těchto časovačů se pohybují od -55 do 125°C.

Dále mohou být časovače pojmenovány podle odvětví, pro které jsou navrženy. Hlavní odvětví jsou kromě běžného užití armáda, automobilový průmysl a vesmírné aplikace. Časovače pro armádu se značí nízkou spotřebou a širokým teplotním pracovním rozsahem. Obvody pro automobilový průmysl si prochází řadou testů, které ověří jejich spolehlivost. Důležitým odvětvím jsou vesmírné aplikace, kde jsou na časovače kladeny nároky v nehostinném prostředí. Katalogy těchto časovačů udávají kritické parametry, jako například odolnost vůči radiaci.

Jednotlivé řady časovačů od sebe můžeme rozlišit těmito vlastnostmi:

- Rozsahem napájecího napětí
- Rozsahem provozních teplot
- Maximální frekvencí v astabilním módu
- Proudem výstupem při vysokém stavu (source)
- Proudem výstupem při nízkém stavu (sink)
- Spotřebou energie
- Kompatibilitou s TTL a CMOS
- Zaměnitelnost s jinými časovači
- Dobou trvání nástupné a sestupné hrany výstupního pulzu
- Typem pouzdra a počtem časovačů
- Teplotní stabilitou

Časovače 555 se vyrábí pro různé technologie montáže v různých pouzdrech:

Tabulka 2 Pouzdra časovačů 555.

Bipolární časovač		CMOS časovač	
THT	SMD	THT	SMD
PDIP	SOIC	PDIP	SOIC
CDIP	SO	CDIP	SO
TO-99	TSSOP		TSSOP
	LCCC		LCCC
	VSSOP		VSSOP
	SSOP		

3.2 Texas Instruments

Tabulka 3 Dostupné časovače výrobce Texas Instruments. [5, 7–18]

Název	Pouzdro Piny	Typ	Rozsah prac. teplot (°C)	f _{MAX} (MHz)	I ⁺ (μA)	Cena za kus (Kč)
NE555	PDIP 8 SOIC 8 SO 8 TSSOP 8	TTL	0-70	0,1	2000	1,07
NE556	PDIP 14 SOIC 14 SO 14 SSOP 14	TTL	0-70	0,1	4000	1,92
NA555	PDIP 8 SOIC 8	TTL	-40-105	0,1	3000	1,28
NA556	PDIP 14 SOIC 14	TTL	-40-105	0,1	4000	2,98
SA555	PDIP 8 SOIC 8	TTL	-40-85	0,1	2000	1,28
SA556	PDIP 14	TTL	-40-85	0,1	4000	2,77
SE555	PDIP 8 SOIC 8	TTL	-55-125	0,1	4000	1,70
SE556	CDIP 14	TTL	-55-125	0,1	2000	204,11
SE555M	CDIP 8 LCCC 20	TTL	-55-125	0,1	2000	174,68
SE555-SP	CDIP 8	TTL	-55-125	0,1	5000	-
TLC556M	CDIP 14 LCCC 20	CMOS	-55-125	2	130	140,19
TLC555-DIE	-	CMOS	-	2	-	4,05
TLC555-Q1	SOIC 8	CMOS	-40-125	2,1	170	5,33
TLC555M	CDIP 8 LCCC 20	CMOS	-55-125	2	250	177,66
TLC556	PDIP 14 SOIC 14	CMOS	-55-125	2	130	8,31
TLC555	PDIP 8 SOIC 8 SO 8 TSSOP 14	CMOS	-40-125	2,1	250	4,05
LMC555	DSBGA 8 PDIP 8 SOIC 8 VSSOP 8	CMOS	-40-125	3	50	6,82
LM555	PDIP 8 SOIC 8 VSSOP 8	TTL	0-70	0,1	3000	6,18
LM555QML	CDIP 8 TO-99 8	TTL	-55-125	0,1	5000	233,26

Výrobce s největším sortimentem časovačů 555 je bezpochyby Texas Instruments. Nabízí širokou škálu časovačů pro běžné užití, armádu, automobilový průmysl i vesmírné aplikace. Většinu vyráběných časovačů nabízí i v pouzdření pro povrchovou montáž a ve své nabídce mají dokonce i časovač ve formě holého čipu bez pouzdra.

Dá se vypořádat že pro značení TTL technologie používají předponu NE, NA, SE a SA která je doplněna číselným údajem z kterého lze odhadnout kolik časovačů je obsaženo v jednom pouzdře. Pro řady CMOS používají předponu TLC. Některé časovače na seznamu jsou označeny příponou M. V těchto případech se jedná o výrobcem zvolené značení pro časovače armádní kvality (M jako Military), které mají obecně lepší tepelné parametry a přibližně stejné dynamické vlastnosti. U armádních časovačů je přirozená vyšší cena.

Při porovnání s dalšími dvěma uvedenými výrobci nabízí firma TI oba typy časovačů za velmi nízkou cenu. Bipolární časovač NE555 nabízí za 1 Kč/ks, což je čtvrtina ceny kterou nabízí ON Semiconductor za časovač podobného typu. V případě CMOS časovače se cena pohybuje okolo 4 Kč/ks, což je osmkrát méně než MI.

3.3 Maxim Integrated

Tabulka 4 Dostupné časovače výrobce Maxim Integrated [6, 18]

Název	Pouzdro Piny	Typ	Rozsah prac. teplot (°C)	f _{MAX} (MHz)	I ⁺ (μA)	Cena za kus (Kč)
ICM7555	CDIP 8 PDIP 8 SOIC N 8	CMOS	-55-125	0,5	250	27,06
ICM7556	PDIP 14 SOIC N 14	CMOS	-55-125	0,5	500	43,46

Firma Maxim Integrated aktuálně vyrábí pouze dvojici časovačů ICM7555 a ICM7556. Oba časovače jsou typu CMOS a vyznačují se velkým rozsahem pracovních teplot srovnatelným s armádními časovači firmy TI.

3.4 ON Semiconductor

Tabulka 5 Dostupné časovače výrobce ON Semiconductor [19]

Název	Pouzdro Piny	Typ	Rozsah prac. teplot (°C)	f _{MAX} (MHz)	I ⁺ (μA)	Cena za kus (Kč)
MC1455	PDIP 8 SOIC 8	TTL	0-70	0,1	3000	4
MC1455B	PDIP 8 SOIC 8	TTL	-40-85	0,1	3000	4,84
NCV1455	PDIP 8 SOIC 8	TTL	-40-125	0,1	3000	5,78

Tak jako předcházející výrobce, firma ON Semiconductor aktuálně vyrábí menší množství časovačů na bázi NE555. V jejím sortimentu jsou časovače typu TTL označené řadou 1455. Vyrábí se 3 varianty, každá pro jiný rozsah pracovních teplot. Výrobce v katalogu udává že tyto časovače jsou přímo zaměnitelné s řadou NE555.

3.5 Časovače dostupné z distribuce GM electronic

GM electronic je distributorem elektroniky a měřících přístrojů se sítí prodejen po celé republice. Ve svém sortimentu nabízejí časovače TTL i CMOS v provedení THT i SMD. Nejčastěji se jedná o časovače zapouzdřené v obalech DIP 8/14 a SO 8/14. Protože mají časovače typu SMD jen horší pracovní rozsah teplot než časovače THT a obtížněji se s nimi manipuluje, bude se práce zabývat pouze časovači s příhodnějšími DIP pouzdry.

3.5.1 Časovač NE555P

Výrobce tohoto časovače je firma Texas Instruments. Časovač je nabízen v 8 vývodovém pouzdře typu DIP. Jedná se o TTL časovač v základní řadě NE555. Dle katalogových hodnot dokáže generovat pulzy do frekvence 0,5 MHz a je uzpůsoben pro provoz v teplotách 0-70°C. Aktuální cena tohoto časovače je 8,70 Kč za 1 kus s DPH. [7]

3.5.2 Časovač SA555P

Vylepšená verze časovače NE555 od firmy Texas Instruments. Výstupní proud je shodný s předchozí variantou a je udáván na 200 mA. Rozsah pracovních teplot je -40-85°C. Rozsah napájení je 4,5-16 V a ostatní parametry jsou také totožné. Cena za kus je 12 Kč včetně DPH. [7]

3.5.3 Časovač TLC555IP

CMOS časovač vyrobený firmou Texas Instruments. Nabízí maximální frekvenci 2,1 MHz, výstupní proud 100 mA a pracovní rozsah teplot -40-85°C. Je nabízen v pouzdře DIP8 které je napájeno rozsahem 2-15 V. Distributorem je nabízen za cenu 24 Kč. [15]

3.5.4 Časovač ICM7555IPAZ

Další z řady CMOS časovačů s nízkou spotřebou, vyrobený firmou Intersil. Distributor udává maximální spotřebu proudu na 200 μ A, frekvenci na 1 MHz a rozsah pracovních teplot na -25-85°C což je neobvyklá hodnota oproti dříve uvedeným časovačům stejné technologie. Cena časovače je 19 Kč což ho řadí jako nejlepší časovač v poměru cena/výkon nabízený distributorem. [20]

4 Základy DC/DC měničů

DC/DC měnič je elektronický obvod, který dokáže měnit velikost výstupního stejnosměrného napětí či proudu z napětí vstupního. Nejjednodušším měničem je lineární regulátor. Jeho nevýhodou je že dokáže napětí pouze snižovat a jeho účinnost je velmi malá. Dalším typem jsou spínané měniče které budou v této části dále rozebrány. [21]

Při volbě vhodného měniče se nejprve rozhodujeme podle potřebného výstupního výkonu. Od těchto výkonostních kategorií se poté odvíjí funkčnost i rozměry měniče. Dle požadovaného výkonu můžeme měniče rozdělit do následujících kategorií:

- Měniče s výkonem do 10 W – konstruovány jako IO s externími součástkami
- Měniče s výkonem do 300 W – konstruovány jako samostatné jednotky nebo DPS
- Měniče s výkonem nad 300 W – konstruovány jako výkonné skříňové jednotky

Další důležitou vlastností DC/DC měničů, je schopnost galvanicky oddělit vstupní a výstupní obvod. Tato vlastnost je přímo způsobena konstrukcí měniče a od toho se odvíjí i princip funkce a použité součástky. Měniče se podle směru konverze napětí můžou dělit na tyto typy:

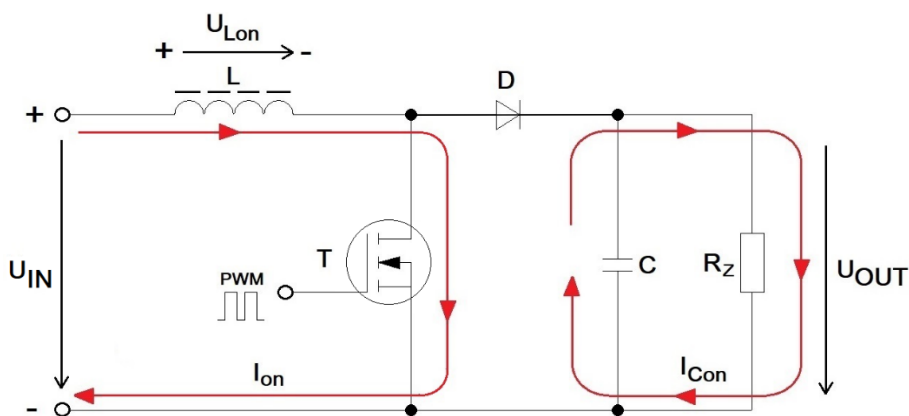
- Step up (Boost) – zvyšující měnič
- Step down (Buck) – snižující měnič
- Step down/up (Buck-boost) – kombinace snižujícího a zvyšujícího měniče
- Inverter – obrací polaritu výstupního napětí ze vstupního o proti společné zemi

4.1 Měniče bez galvanického oddělení

Měniče bez galvanického oddělení jsou měniče, které mají vstup i výstup připojen ke společnému zemnímu potenciálu. Pro konverzi energie využívají zejména cívek a kondenzátorů. Jejich výhodou oproti měničům s transformátory, je malý rozměr samotného měniče. Nevýhodou je, že nemohou dosahovat velkého výkonu tak jako měniče s transformátory a s rostoucím měnicím poměrem klesá jejich účinnost. V následující části budou popsány základní topologie měničů, na kterých bude vysvětlen jejich princip funkce. [21]

Zvyšující měnič (boost)

Na Obr. 10 je schéma zvyšujícího měniče v 1. fázi spínání. Vysoká úroveň PWM signálu otevře tranzistor T po dobu t_1 a indukčností L začne protékat proud I_{on} . V tento moment odebírá měnič energii ze zdroje s napětím U_{IN} a akumuluje ji v magnetickém poli indukčnosti.



Obr. 12 Zvyšující DC/DC měnič: tranzistor T sepnut

Zátěž je napájena vybíjecím proudem kondenzátoru C a aby se zabránilo vybíjení kondenzátoru skrze tranzistor T, když je sepnut, je mezi nimi připojena dioda D.

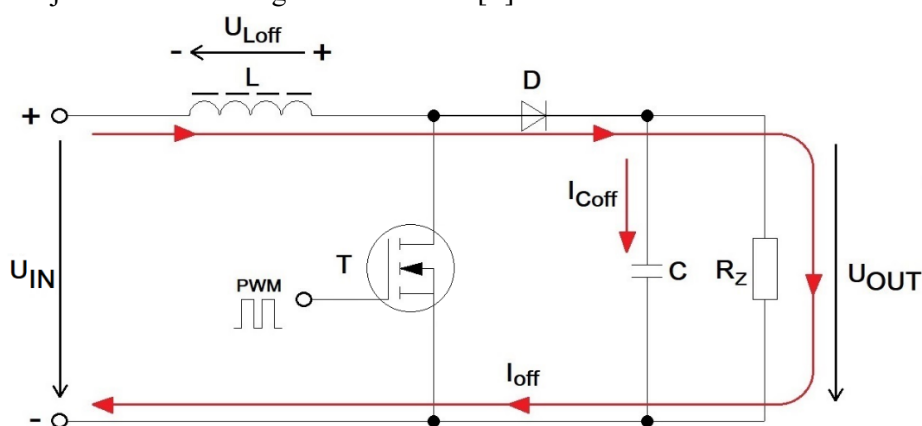
Proud indukčnosti narůstá po dobu t_1 až do doby t_2 kdy dojde k uzavření tranzistoru. Při rozpínání tranzistoru, má tlumivka tendenci zachovat směr toku proudu a vzniká na ní indukované napětí dle Lenzova zákona:

$$U_{ind} = -L \cdot \frac{\Delta I_{on}}{\Delta t} \quad (4)$$

Toto napětí se přičte k napětí zdroje U_{IN} a skrze diodu poteče do výstupního kondenzátoru a zátěže proud I_{off} . Výstupní napětí pak bude součtem tohoto sériového napětí a úbytku na polovodičových prvcích. Hodnota napětí které se naindukuje na tlumivce závisí na hodnotě proudu tlumivkou, velikosti indukčnosti a rychlosti sepnutí. Podle této úvahy může být výstupní napětí teoreticky libovolně vysoké. Proto bude pro výstupní napětí platit, že je jeho velikost větší než U_{IN} a bude mít hodnotu:

$$U_{OUT} = U_{IN} \cdot \frac{1}{(1-D)} \quad (5)$$

Kde U_{OUT} je výstupní napětí měniče [U_{OUT}]=V,
 U_{IN} je vstupní napětí měniče [U_{IN}]=V,
 D je střída řídicího signálu tranzistoru [D].



Obr. 13 Zvyšující DC/DC měnič: tranzistor T rozepnut

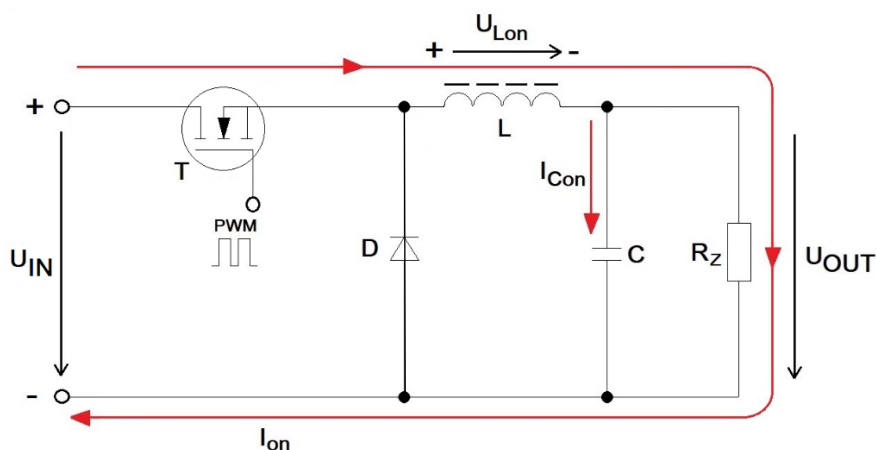
Snižující měnič (buck)

Na Obr. 12 je Schéma snižujícího měniče napětí. V prvním čase periody řídicího signálu t_1 je sepnut tranzistor T a výstupní kondenzátor a zátěž je napájena proudem ze zdroje I_{on} . Během této doby narůstá proud I_{on} , až do času kdy se uzavře tranzistor T.

Po uzavření tranzistoru má proud indukčnosti tendenci pokračovat ve svém směru. Vlivem této vlastnosti se obrátí polarita napětí na indukčnosti L a tlumivka se chová jako zdroj. Proud z tlumivky, nabíjí kondenzátor C skrze diodu D a napětí na kondenzátoru pohání zátěž. Maximem výstupního napětí U_{OUT} je napětí na vstupu U_{IN} . Velikost výstupního napětí má pak hodnotu:

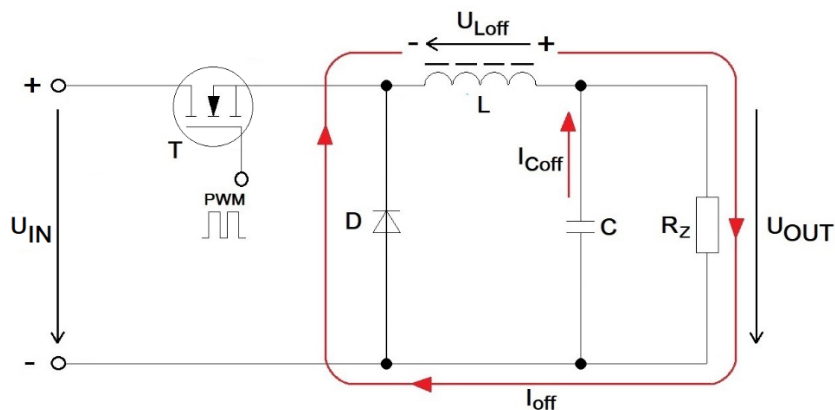
$$U_{OUT} = U_{IN} \cdot D \quad (6)$$

Z této rovnice plyne, že pokud budeme zvyšovat dobu t_1 , poroste napětí na výstupu a prodlužováním doby t_2 docílíme poklesu výstupního napětí.



Obr. 14 Snižující DC/DC měnič: tranzistor T sepnut

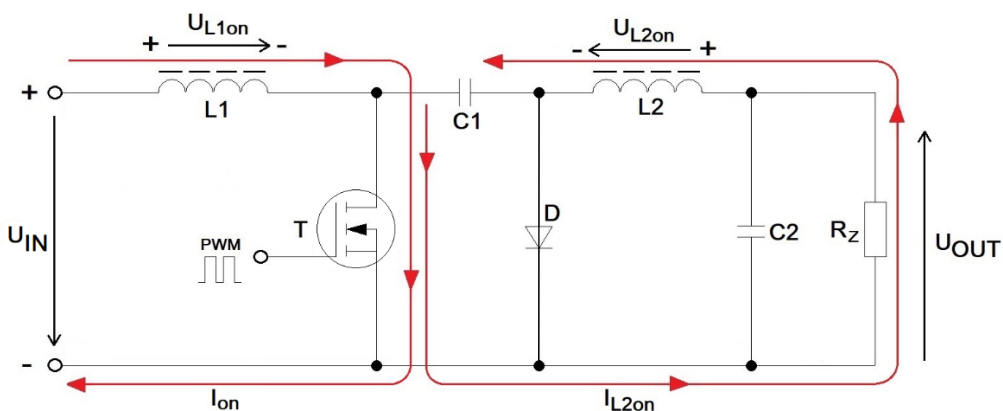
Výhodou tohoto zapojení je jednoduchá konstrukce, malý počet elektronických součástek a z toho vyplývá nízká cena. Nevýhodou je absence galvanického oddělení, omezení výkonu na přibližně 50W a riziko zničení tranzistoru při zkratu na výstupu. Střída spínání se zde pohybuje v plném rozsahu.



Obr. 15 Snižující DC/DC měnič: tranzistor T rozepnut

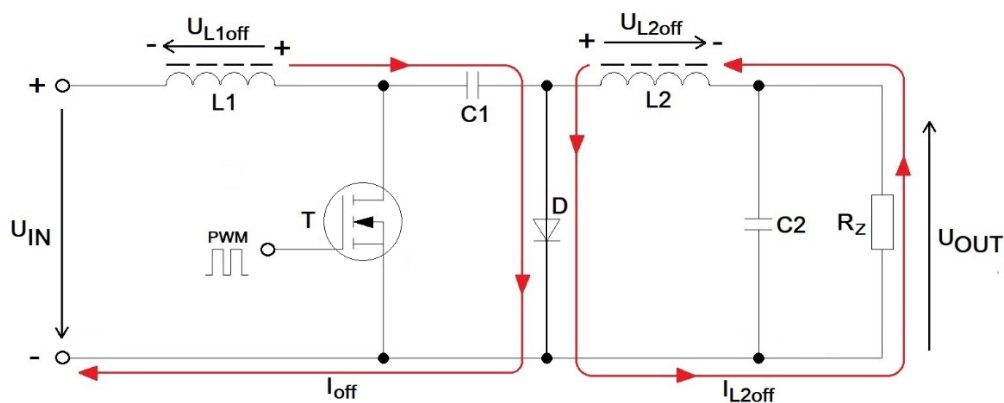
Zvyšující i snižující měnič (buck-boost)

Čukův měnič je odvozen ze zapojení zvyšujícího a snižujícího měniče. Vstupní strana vypadá jako zvyšující a výstupní skoro jako snižující měnič. Tento měnič dokáže zvyšovat i snižovat výstupní napětí při kolísání napětí vstupního. Na Obr. 16 je schéma daného měniče. V první fázi dojde k sepnutí tranzistoru T a tlumivkou $L1$ začne protékat vzrůstající proud I_{on} skrze tranzistor do zdroje.



Obr. 16 Čukův DC/DC měnič: tranzistor T sepnut

Druhá fáze začíná při uzavření tranzistoru T. Polarita napětí na cívce se obrátí a cívka se stane zdrojem. Proud ze zdroje se spojí s proudem cívky a začne protékat skrze tranzistor C1 a diodou D do zdroje. Proud I_{off} může protékat kondenzátorem C1, protože obsahuje střídavou složku klesajícího proudu tlumivky L1. Tímto se kondenzátor C1 začne nabíjet napětím $U_{IN} + U_{L1off}$.



Obr. 17 Čukův DC/DC měnič: tranzistor T rozeprt

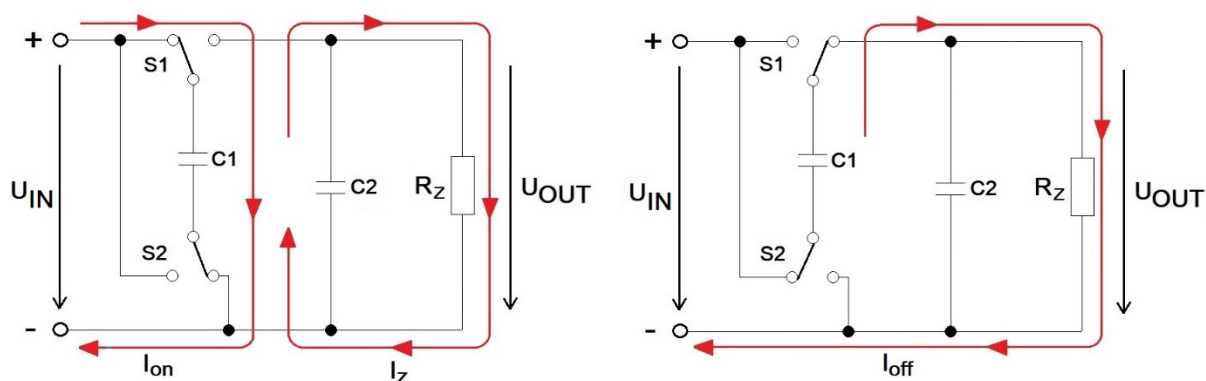
V třetí fázi se opět otevře tranzistor a cívku L1 se začne zvyšovat proud skrze tranzistor T do zdroje. Nyní je však nabitý kondenzátor C1 a začne jím protékat proud I_{L2on} , skrze tranzistor T a kondenzátor C2 paralelně spojený se zátěží a sériově s cívku L2. Po opětovném uzavření tranzistoru se akumulací cyklus opakuje a cívka L2 se chová jako zdroj který napájí zátěž a kondenzátor C2 skrze diodu D. Pokud v žádném pracovním cyklu proud cívku L1 nepoklesne na nulovou hodnotu, výstupní napětí bude mít velikost:

$$U_{OUT} = \frac{U_{IN} \cdot D}{(1-D)} \quad (7)$$

Nábojová pumpa

Dalším typem měničů bez galvanického oddělení jsou nábojové pumpy. Tyto měniče používají pro akumulaci energie spínané kondenzátory a dokáží měnit polaritu nebo násobit a dělit napětí. Na Obr. 16 je schéma nábojové pumpy jako zdvojnásobovače napětí. V první fázi spínání je tranzistor C1 připojen paralelně se zdrojem a nabíjí se na napětí U_{IN} . Po nabití se přepnou spínací prvky S1 a S2 a kondenzátor C1 se připojí do série se zdrojem. Výstupní napětí bude mít v ideálním případě dvojnásobnou velikost:

$$U_{OUT} = 2 \cdot U_{IN} \quad (8)$$



Obr. 18 Nábojová pumpa: akumulace energie (vlevo); vybíjení do zátěže (vpravo)

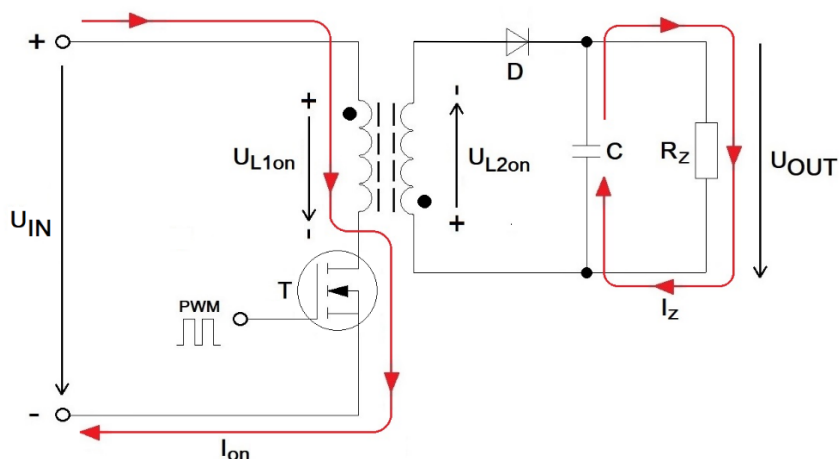
4.2 Měníče s galvanickým oddělením

Jak už název napovídá, měniče s galvanickým oddělením jsou měniče, jejichž hlavní výhodou je, že mají výstupní napětí izolované od napětí vstupního. Pro dosažení této vlastnosti je zapotřebí transformátor jako spínaný prvek. Existuje mnoho typů měničů s transformátorem, které se liší zejména výstupním výkonem a principem funkce. Popsán proto bude nejjednodušší typ. [21]

Akumulační měnič (flyback)

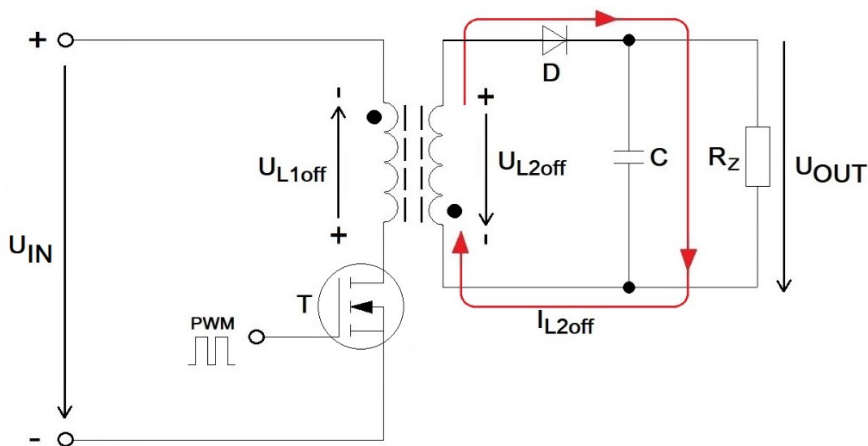
Na Obr. 19 je schéma akumulčního měniče, také nazývaného flyback. Akumulační měnič pracuje v blokovacím režimu. To znamená, že pokud primárním vinutím L_1 teče proud, je sekundární vinutí L_2 s diodou D polarizováno tak že jím proud neprotéká. Tečky u jednotlivých vinutí označují začátek vinutí.

Při sepnutém tranzistoru T narůstá proud vinutím L_1 a transformátor akumuluje energii v jeho magnetickém obvodu. Lineární růst proudu I_{on} vyvolá lineární růst magnetického toku v jádru transformátoru a lineární magnetický tok vyvolá konstantní napětí U_{L2on} na sekundární cívce. Kvůli polaritě sekundárního vinutí a diody D , nemůže proud protékat sekundárním vinutím.



Obr. 19 Akumulační měnič: tranzistor T sepnut

Teprve po rozepnutí tranzistoru T dojde k přerušení toku proudu I_{on} a sekundárním vinutím začne protékat proud I_{L2off} . Jelikož tento typ měniče akumuluje energii v magnetickém obvodu, jeho výkon kriticky souvisí s množstvím magnetického materiálu transformátoru.



Obr. 20 Akumulační měnič tranzistor: T rozepnut

5 Měření parametrů časovačů 555

Statické parametry časovačů byly změřeny na monostabilním zapojení a dynamické parametry na astabilním. Hodnoty RC komponent a zátěže, byly voleny tak aby odpovídaly katalogovému listu. Předmětem měření bylo změření následujících parametrů:

- Minimální napájecí napětí U_{CCMIN}
- Spotřeba ze zdroje I_{CC} pro stavy H a L při $U_{CC} = 5$ a 15 V
- Výstupní napětí U_O pro stavy H a L při definovaném zatížení
- Maximální výstupní proud I_{OL} (sink) a I_{OH} (source) při $U_{CC} = 5$ V
- Doba nástupné t_R a sestupné hrany t_F
- Maximální frekvence v astabilním zapojení f_{MAX}

5.1 Měření bipolárních časovačů

5.1.1 Časovač NE555P

Tabulka 6 Katalogové hodnoty pro xx555P [7]

Parametr	Testovací podmínky		NE555 SA555		Jednotka
			min	typ max	
Napájecí napětí			4,5	16	V
Napájecí proud	Výstup L, bez zátěže	$U_{CC}=15$ V	10	15	mA
		$U_{CC}=5$ V	3	6	
	Výstup H, bez zátěže	$U_{CC}=15$ V	9	13	
		$U_{CC}=5$ V	2	5	
Výstupní napětí při stavu L	$U_{CC}=5$ V; $I_{OL} = 8$ mA		0,15	0,4	V
Výstupní napětí při stavu H	$U_{CC}=5$ V; $I_{OH} = -100$ mA		2,75	3,3	V
Výstupní proud	$U_{CC}=5$ V		± 200		mA
Doba nástupné hrany t_R	$U_{CC}=5$ V; $C_L = 15$ pF		100	200	ns
Doba sestupné hrany t_F	$U_{CC}=5$ V; $C_L = 15$ pF		100	200	ns

Tabulka 7 Naměřené hodnoty pro NE555P

Min. napájecí napětí (V)	Spotřeba proudu ze zdroje (mA)				Výstupní napětí (mV V)		Výstupní proud (mA)		Doba změny hrany (ns)		Maximální frekvence oscilátoru (kHz)
[-]	$U_{CC}=5$ V		$U_{CC}=15$ V		$U_{CC}=5$ V		$U_{CC}=5$ V		$U_{CC}=5$ V		$U_{CC}=5$ V
U_{CCMIN}	I_{CCOL}	I_{CCOH}	I_{CCOL}	I_{CCOH}	U_{OL}	U_{OH}	I_{OL}	I_{OH}	t_R	t_F	f_{MAX}
3,45	2,166	1,366	5,937	4,062	84,84	3,43	335	430	140	128	233

5.1.2 Časovač SA555P

Tabulka 8 Naměřené hodnoty pro SA555P

Min. napájecí napětí (V)	Spotřeba proudu ze zdroje (mA)				Výstupní napětí (mV V)		Výstupní proud (mA)		Doba změny hrany (ns)		Maximální frekvence oscilátoru (kHz)
[-]	$U_{CC}=5\text{ V}$		$U_{CC}=15\text{ V}$		$U_{CC}=5\text{ V}$		$U_{CC}=5\text{ V}$		$U_{CC}=5\text{ V}$		$U_{CC}=5\text{ V}$
U_{CCMIN}	I_{CCOL}	I_{CCOH}	I_{CCOL}	I_{CCOH}	U_{OL}	U_{OH}	I_{OL}	I_{OH}	t_R	t_F	f_{MAX}
2,4	2,273	1,416	6,160	4,191	80,92	3,46	330	470	128	96	260

5.1.3 Vyhodnocení výsledků měření bipolárních časovačů

Časovače NE555P jsou se svými parametry shodné s SA555P, jediný rozdíl je v teplotním rozsahu. Oba časovače dokázaly spojitě pracovat alespoň 1 V pod touto hranicí (v astabilním režimu). Minimální hodnota napájecího napětí je udávána na 4,5 V. Časovač NE555P dokázal pracovat do 3,45 V a SA555P do 2,4 V.

Změřená spotřeba ze zdroje pro napětí 5 V byla přibližně třikrát menší než pro 15 V. Časovač NE555P odebíral ze zdroje při stavu L 2,273 mA a při stavu H 1,416 mA. Katalog udával při stavu L typický proud 3 mA a při stavu H proud 2 mA. Při napájecím napětí 15 V to bylo pro stav L 6,16 mA a stav H 4,191 mA. Katalog definoval typický proud pro stav L 10 mA a stav H proud 9 mA. Naměřené hodnoty pro časovač SA555P se téměř nelišily od NE555P. Oba časovače tedy pracovaly pod hodnotou kterou udával výrobce.

Výstupní napětí při jmenovitém zatížení sink 8 mA dosahovalo pro výstup L nejvyšší hodnoty 84,84 mV a to u časovače NE555. Pro stav H a zatížení source 100 mA, výstupní napětí pokleslo na 3,43 V pro časovač NE555P a 3,46 V pro SA555P. Naměřené hodnoty odpovídají požadavkům TTL logických úrovní na Obr. 5, přičemž splňují katalogové parametry s dostatečnou rezervou.

Výstupní proud byl měřen bez omezení, tedy přesahoval maximální katalogové hodnoty. Ve stavu H oba časovače přesahovaly hodnotu 400 mA výstupního proudu, což je dvojnásobek katalogové hodnoty. Při stavu L protékal maximální proud sink časovačem NE555P o hodnotě 335 mA a časovačem SA555P 330 mA. Proudová zatížitelnost výstupů je pro oba obvody přibližně stejná. Katalog definuje maximální hodnotu výstupního proudu na 200 mA pro oba směry proudu. Při dodržení této hranice jsou proudy výstupem symetrické.

Dynamické parametry byly změřeny na astabilním zapojení. Změřená doba změny hrany obou časovačů vyšla dle předpokladů. Pro nástupnou hranu časovače NE555P to bylo 140 ns a sestupnou 128 ns. Nástupná hrana časovače SA555P trvala 128 ns a sestupná 96 ns. U obou časovačů můžeme pozorovat, že nástupná hrana trvá déle než sestupná. Oba časovače se v tomto ohledu chovají totožně.

Maximální frekvence oscilátoru byla změřena pro průběh, který ještě odpovídal obdelníkovému. Jelikož katalog nespecifikoval RC hodnoty nad 100 kHz, měření proběhlo empiricky. Na volbu hodnot RC má největší vliv vstupní impedance časovače, která však není udávána katalogem. Impedance vstupních obvodů bipolárního časovače je podstatně nižší než u unipolární varianty a její nízká hodnota negativně ovlivňuje dosažitelnou frekvenci. Maximální frekvence byla zjištěna pro $R_A = 1\text{ k}\Omega$, $R_B = 2\text{ k}\Omega$, $C = 1\text{ nF}$, kde R_B byl realizován potenciometrem o hodnotě 10k. Časovač NE555P dosáhl frekvence 233 kHz a SA555P frekvence 260 kHz, což jsou o proti katalogu více než dvojnásobné hodnoty.

5.2 Měření CMOS časovačů

5.2.1 Časovač TLC555I P

Tabulka 9 Katalogové hodnoty pro TLC555I P [15]

Parametr	Testovací podmínky	TLC555I P			Jednotka
		min	typ	max	
Napájecí napětí		3		15	V
Napájecí proud	$U_{CC}=5\text{ V}$	170		350	μA
	$U_{CC}=15\text{ V}$	360		600	
Výstupní napětí při stavu L	$U_{CC}=5\text{ V}; I_{OL}=8\text{ mA}$	0,21		0,4	V
Výstupní napětí při stavu H	$U_{CC}=5\text{ V}; I_{OH}=-1\text{ mA}$	4,1		4,8	V
Výstupní proud	$U_{CC}=5\text{ V}; \text{Sink}$			150	mA
	$U_{CC}=5\text{ V}; \text{Source}$			15	
Doba nástupné hrany t_r	$U_{CC}=5\text{ V}; R_L=10\text{ M}\Omega, C_L=15\text{ pF}$	20		75	ns
Doba sestupné hrany t_f	$U_{CC}=5\text{ V}; R_L=10\text{ M}\Omega, C_L=15\text{ pF}$	15		60	ns
Maximální frekvence v ast. módu	$R_A=470\ \Omega, C_T=200\text{ pF}, R_B=200\ \Omega$	1,2		2,1	MHz

Tabulka 10 Naměřené hodnoty pro TLC555I P

Min. napájecí napětí (V)	Spotřeba proudu ze zdroje (μA)					Výstupní napětí (mV V)		Výstupní proud (mA)		Doba změny hrany (ns)		Maximální frekvence oscilátoru (MHz)
[-]	$U_{CC}=5\text{ V}$		$U_{CC}=15\text{ V}$			$U_{CC}=5\text{ V}$		$U_{CC}=5\text{ V}$		$U_{CC}=5\text{ V}$		$U_{CC}=5\text{ V}$
U_{CCMIN}	I_{CCOL}	I_{CCOH}	I_{CCOL}	I_{CCOH}		U_{OL}	U_{OH}	I_{OL}	I_{OH}	t_r	t_f	f_{MAX}
2,853	120	115	205	190		15,87	4,41	85	15	36	39	1,21

5.2.2 Časovač ICM7555IPAZ

Tabulka 11 Katalogové hodnoty pro ICM7555IPAZ [20]

Parametr	Testovací podmínky	ICM7555IPAZ			Jednotka
		min	typ	max	
Napájecí napětí		2		18	V
Napájecí proud	$U_{CC}=5\text{ V}$	30		120	μA
	$U_{CC}=15\text{ V}$	30		250	
Výstupní napětí při stavu L	$U_{CC}=5\text{ V}; I_{OL}=3,2\text{ mA}$	0,15		0,4	V
Výstupní napětí při stavu H	$U_{CC}=5\text{ V}; I_{OH}=-2\text{ mA}$	4		4,5	V
Výstupní proud	$U_{CC}=5\text{ V}; \text{Sink}$			50	mA
	$U_{CC}=5\text{ V}; \text{Source}$			7	
Doba nástupné hrany t_r	$U_{CC}=5\text{ V}; R_L=10\text{ M}\Omega, C_L=10\text{ pF}$	35	40	75	ns

Parametr	Testovací podmínky	ICM7555IPAZ			Jednotka
		min	typ	max	
Doba sestupné hrany t_f	$U_{CC}=5\text{ V}; R_L=10\text{ M}\Omega, C_L=10\text{ pF}$	35	40	75	ns
Maximální frekvence v ast. módu	$R_A=470\text{ }\Omega, C_T=200\text{ pF}, R_B=200\text{ }\Omega$	500			kHz

Tabulka 12 Naměřené hodnoty pro ICM7555IPAZ

Min. napájecí napětí (V)	Spotřeba proudu ze zdroje (μA)				Výstupní napětí (mV V)		Výstupní proud (mA)		Doba změny hrany (ns)		Maximální frekvence oscilátoru (MHz)
[-]	$U_{CC}=5\text{ V}$		$U_{CC}=15\text{ V}$		$U_{CC}=5\text{ V}$		$U_{CC}=5\text{ V}$		$U_{CC}=5\text{ V}$		$U_{CC}=5\text{ V}$
U_{CCMIN}	I_{CCOL}	I_{CCOH}	I_{CCOL}	I_{CCOH}	U_{OL}	U_{OH}	I_{OL}	I_{OH}	t_R	t_F	f_{MAX}
1,45	89,7	86,5	134,3	120,0	2,55	4,81	50	6,66	24	75	1,30

5.2.3 Vyhodnocení výsledků měření CMOS časovačů

Změřené napájecí napětí pro časovač TLC odpovídá katalogové hodnotě. Jeho hodnota činí 2,853 V, což se blíží minimální hodnotě 3 V. Časovač ICM vychází s tímto parametrem relativně lépe. Fungoval až do napětí 1,45 V, přičemž výrobce stanovil minimální hodnotu na 2 V.

Pro napájecí proud ze zdroje, časovače vykazují pouze minimální rozdíl mezi stavu H a L. Časovač TLC spotřebovává do 120 μA pro $U_{CC} = 5\text{ V}$ a 205 μA pro $U_{CC} = 15\text{ V}$. Spotřeba časovače ICM je podstatně nižší než TLC. Odebírá do 89,7 μA pro $U_{CC} = 5\text{ V}$ a 134,3 μA pro $U_{CC} = 15\text{ V}$. Katalog časovače ICM stanovuje typickou spotřebu na 30 μA . Změřená spotřeba přesahuje tuto hodnotu pro obě hladiny napájecího napětí.

Pro časovač TLC ve stavu L, bylo změřeno výstupní napětí 15,87 mV a ve stavu H napětí 4,41 V. ICM časovač dosahoval při katalogovém zatížení žádanějších hodnot. Při stavu L vykazoval napětí 2,55 mV a při stavu H 4,81 V. Měření prokazuje, že naměřené hodnoty napětí jsou lepší než rozsah udávaný katalogem pro oba časovače. Na obou časovačích lze však pozorovat nesymetrii výstupního napětí při poměru úbytek napětí/výstupní proud.

Výstupní proud sink časovače TLC dosahoval hodnoty 85 mA a proud source 15 mA. Hodnota source odpovídá maximální hodnotě katalogu, ale proud sink dosahoval přibližně poloviny maxima. Časovač ICM dosahoval relativně nižších výsledků než TLC. Výstupem protékal maximální proud sink 50 mA a source 6,66 mA. Katalog specifikoval maximální hodnotu proudu sink 50 mA a source 7 mA. Měření se s těmito proudy přesně shoduje.

Naměřené doby změny hran odpovídají katalogu. U časovače TLC trvala nástupná hrana 36 ns a sestupná 39 ns, což je přibližně v polovině tolerovaného rozsahu. V tomto měřeném dynamickém parametru se časovač ICM choval nesymetricky. Nástupná hrana trvala pouze 24 ns, kdežto výrobce udává minimální hodnotu 35 ns. Sestupná hrana trvala 75 ns, což byla dle katalogu maximální hodnota. Pokud bychom výstup zatížili nepatrně více, nemusel by už odpovídat toleranci.

Měření maximální frekvence v ast. módu proběhlo při stejných podmínkách. Dosazením hodnot do vzorce (1.3) v kapitole 1.2, dosáhneme teoretické frekvence 8,3 MHz. Časovače tedy budou nuceny pracovat maximální frekvencí. Časovač TLC dosáhl frekvence 1,21 MHz a katalog specifikoval tuto hodnotu na 1,2 až 2,1 MHz. Měřený časovač tedy dosahuje minima co udává výrobce. ICM časovač dosáhl frekvence 1,3 MHz a byla pro něj stanovena minimální frekvence 500 kHz kterou splňuje.

6 Realizace vzorků měničů

V této kapitole je popsán návrh zvyšujícího a snižujícího měniče napětí, jehož hlavní součástí tvoří časovač 555. V obou zapojeních je použita varianta CMOS časovače TLC555I P. Pro každé zapojení je popsán princip funkce a určeny použité komponenty. Pro každý realizovaný měnič byla změřena zatežovací charakteristika pro různé hodnoty střídy. Z těchto naměřených dat pak vychází grafy s účinnostmi.

6.1 Použité hodnoty časovacích prvků

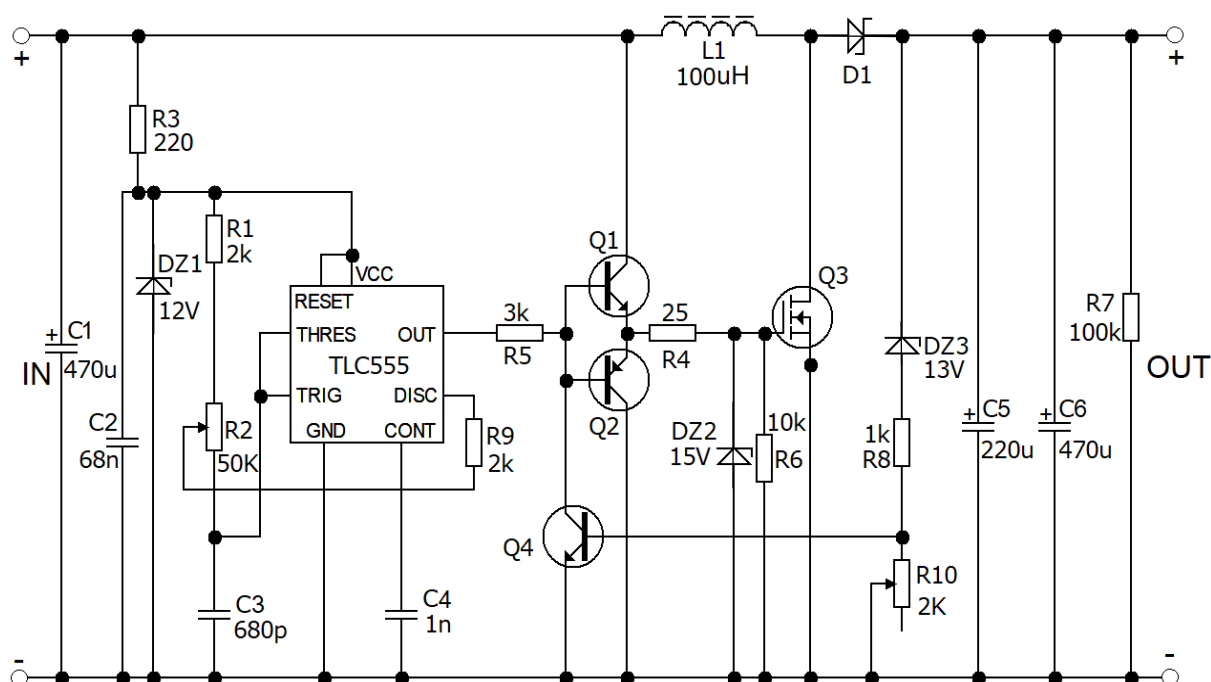
V následující tabulce se nachází hodnoty RC prvků použitých při ověřování měničů. Tabulka platí pro oba dva měniče.

Tabulka 13 Použité hodnoty časovacích prvků pro astabilní režim

C=konz. 680 pF	D=50%	D=60%	D=70%	D=80%	D=90%
R_1 (k Ω)	1	10	10	20	47
R_2 (k Ω)	20	20	6,8	6,8	4,7
f (kHz)	52	42,5	90	63	38

6.2 Realizace zvyšujícího měniče napětí

6.2.1 Schéma zapojení



Obr. 21 Schéma zapojení zvyšujícího měniče s časovačem TLC555

6.2.2 Princip funkce realizovaného měniče

Princip funkce časovače v astabilním zapojení a zvyšujícího měniče byl popsán v kapitolách 1.2 a 4.1. Základem měniče je časovač TLC555 I pracující v astabilním zapojení. Střídu výstupního signálu časovače je možné manuálně měnit pomocí potenciometru R2 v rozmezí 50 až 90%. Rezistor R1 může být vynechán a nahrazen zkratem, jeho význam je pro použití bez potenciometru. Rezistor R9 slouží jako dolní hranice pokud by se R2 dostal do mezní polohy. Výstup časovače je skrze omezující odpor

R5 připojen na budič, který má za úkol zajistit co nejefektivnější spínání tranzistoru Q3. Výstupem časovače je obdelníkový signál se střídou dle okamžité polohy R2. Pokud by měnič nepracoval v zatížení, jeho výstupní napětí by nekontrolovatelně rostlo a mohlo by dojít ke zničení tranzistoru Q3 a výstupních kondenzátorů. Výstupní napětí je omezováno skrze zenerovu diodu DZ3, která při překročení zvoleného napětí aktivuje tranzistor Q4 a ten zabrání budiči spínat tranzistor Q3. Tímto dojde k poklesu výstupního napětí až do doby, kdy bude opět výstupní napětí nižší než zvolené a aktivuje se spínání tranzistoru Q3. Tento proces se pak cyklicky opakuje.

6.2.3 Volba komponent a výstupního napětí

Teoreticky je toto zapojení možné použít pro široký rozsah vstupních i výstupních napětí. Základním limitem je napájecí napětí časovače a maximální hodnoty polovodičových spínacích prvků. Tento problém se dá řešit vhodnou volbou rezistorů a zenerových diod.

Realizovaný měnič byl konstruován pro vstupní napětí $U_{IN} = 10 \text{ V}$ a výstupní napětí $U_{OUT} = 15 \text{ V}$.

Kondenzátory musí být dimenzovány tak, aby nedošlo k jejich průrazu. Zpravidla volíme dvojnásobek této hodnoty. Použité kondenzátory jsou určeny do napětí 35 V. Použité kondenzátory musí mimo jiné splňovat proudové požadavky, respektive musí se jednat o kondenzátory určené pro pulzní provoz. Tyto kondenzátory se vyznačují nízkým ESR. Při volbě kapacity výstupních kondenzátorů se uvažuje spínací frekvence, zvlnění proudu tlumivkou a zvlnění napětí. Zjednodušeně lze říci, že čím vyšší kapacita, tím hladší výstupní průběh. Zvolené výstupní kondenzátory mají hodnotu **220 a 470 μF** .

Spínací tranzistor se volí tak, aby nezpůsobil zbytečné ztráty a zároveň nedošlo k jeho průrazu. V případě tranzistoru MOSFET, je jedním z parametrů odpor v sepnutém stavu $R_{DS(on)}$. Tento parametr volíme co nejnižší vzhledem k návrhu. Zbylé ztráty na tranzistoru jsou způsobeny převážně při době přechodu z vodivého do nevodivého stavu a naopak. Podobně jako u kondenzátoru, maximální napětí tranzistoru U_{DSS} se dimenzuje na dvojnásobek. Použitý spínací tranzistor je unipolární N-kanál STP36NF06 s parametry $R_{DS(on)} < 0,04 \Omega$ a $U_{DSS} = 60 \text{ V}$.

Dioda na výstupu měniče je důležitým prvkem pro snížení ztrát. Musí být schopna dostatečně rychle spínat proudové pulzy s vysokou frekvencí a mít co nejmenší napěťovou ztrátu v propustném směru. Ztráty na diodě se skládají zejména z dynamického chodu, blokování a statické ztráty. Pro hrubé nastínění je zde vzorec pro ztrátový výkon diody v propustném směru:

$$P = U_F \cdot I_F \quad (9)$$

Kde U_F je prahové napětí diody $[U_F] = \text{V}$,
 I_F je střední hodnota proudu $[I_F] = \text{A}$,
 P je ztrátový výkon $[P] = \text{W}$.

Pro tuto aplikaci se hodí především schottkyho dioda. Zvolená dioda nese označení 1N5820 a její hlavní parametry jsou: $U_F = 0,4 \text{ V}$, $U_{RRM} = 30 \text{ V}$ a $I_F = 3 \text{ A}$.

Tlumivka se volí dle několika parametrů. Pokud nejsou kladeny konkrétní nároky na výstupní proud, může se použít následující vzorec pro odhad velikosti proudu tlumivkou[22]:

$$\Delta I_L = (0,2 \text{ až } 0,4) \cdot I_{OUT(max)} \cdot \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \quad (10)$$

$$\Delta I_L = 0,3 \cdot 1 \cdot \frac{15}{10} = 0,45 \text{ A} \quad (11)$$

Kde ΔI_L je zvlňný proud tlumivkou $[\Delta I_L] = \text{A}$,
 $I_{OUT(max)}$ je maximální navrhnutý proud výstupem $[I_{OUT(max)}] = \text{A}$,

U_{OUT} je výstupní napětí měniče $[U_{OUT}] = V$,
 U_{IN} je vstupní napětí měniče $[U_{IN}] = V$.

Dle velikosti zvlnění proudu se určí indukčnost tlumivky[22]:

$$L = \frac{U_{IN} \cdot (U_{OUT} - U_{IN})}{\Delta I_L \cdot f_s \cdot U_{OUT}} \quad (12)$$

$$L = \frac{10 \cdot (15 - 10)}{0,45 \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 15} = 1,48 \cdot 10^{-4} = 148 \mu H \quad (13)$$

Kde L je hodnota indukčnosti tlumivky $[L]=H$,
 f_s je frekvence spínání tranzistoru Q3 $[f_s]=Hz$.

Jelikož měnič pracuje s proměnlivou střídou, frekvencí i zátěží a indukčnost tlumivky nemá smysl za provozu měnit, byla použita tlumivka s hodnotou **100 μH** .

Důvodem použití **budiče** je nesymetrie výstupních proudů a snížení proudového a tepelného namáhání časovače. Budiče jsou obecně konstruovány z komplementárních tranzistorů. Takto se označují například tranzistory typu NPN a PNP se stejnými vlastnostmi a charakteristikami. Pro budič jsou zvoleny tranzistory NPN 2N5551 a PNP 2N5401. Ačkoliv se nejedná o komplementární tranzistory, svými charakteristikami vyhovují. Budič je schopen dodávat do gatu tranzistoru Q3 symetrický špičkový proud **$\pm 400 \text{ mA}$** , který je limitován rezistorem R4.

Výstupní napětí měniče se omezí při aktivaci tranzistoru Q4 2N5551. Rezistory R8 a R10 tvoří dělič napětí který je připojen na bázi tranzistoru. Úbytek na přechodu báze-emitor spolu s úbytkem na zenerové diodě pak určuje hodnotu výstupního napětí měniče. Výchozí poloha trimru R10 je v polovině odporové dráhy, tedy 1 k Ω . Výstupní napětí lze tedy nastavit dle následujícího vzorce:

$$U_{OUT} = U_{ZV} + U_{BE} \cdot \frac{R_{10}}{R_{10} + R_8} \quad (14)$$

$$U_{OUT} = 13 + 0,7 \cdot \frac{1000}{1000 + 1000} = 13,35 \text{ V} \quad (15)$$

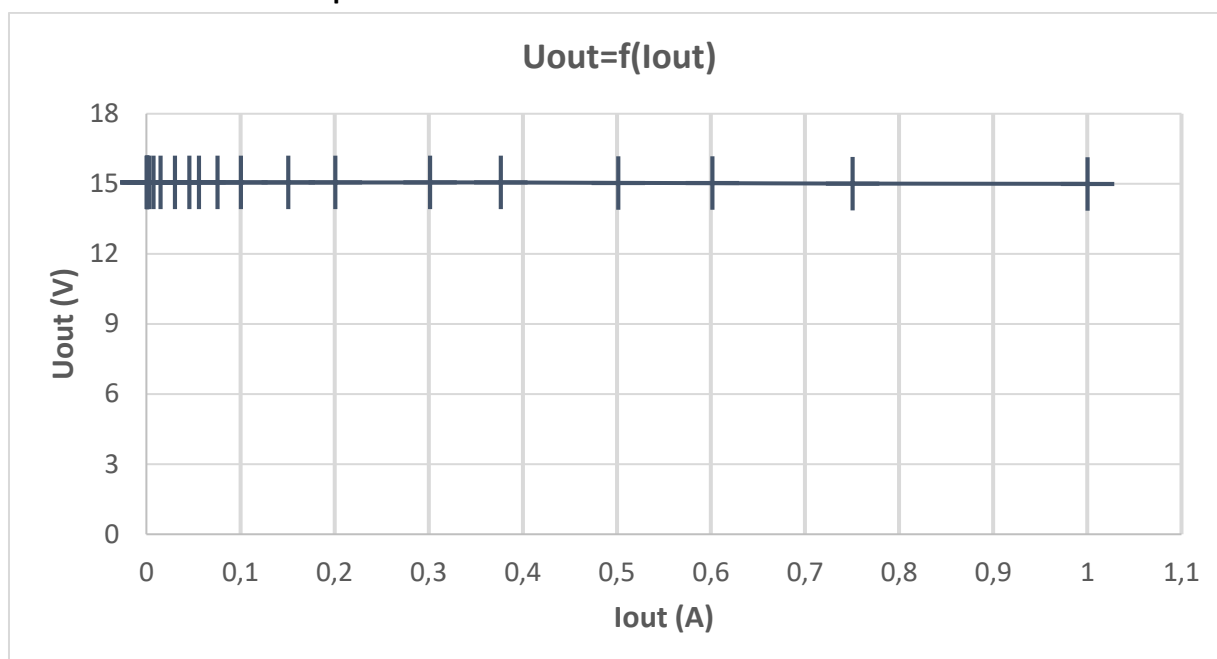
Kde U_{ZV} je závěrné napětí zenerovy diody DZ3 $[U_{ZV}] = V$,
 U_{BE} je úbytek napětí na přechodu B-E tranzistoru Q4 $[U_{BE}] = V$,
 R_8 je odpor rezistoru $R_8 [R_8] = \Omega$,
 R_{10} je odpor trimru $R_{10} [R_{10}] = \Omega$,

Výstupní napětí je dále doladěno pomocí trimru R10 na požadovanou hodnotu $U_{OUT} = 15 \text{ V}$. Rezistor R8 musí být dimenzován tak, aby nedošlo k tepelnému přetížení tranzistoru Q4. Uvedení trimru do koncové polohy má za následek vypnutí omezování napětí a nekontrolovatelný nárůst výstupního napětí. Při nastavování výstupního napětí se musí této chybě předejít.

Výhodou omezování výstupního napětí se zenerovou diodou je skutečnost, že měnič může pracovat s proměnlivou hodnotou vstupního napětí bez změny výstupního napětí. Nastavený pracovní bod tranzistoru Q4 zůstává vzhledem ke vstupnímu napětí beze změny.

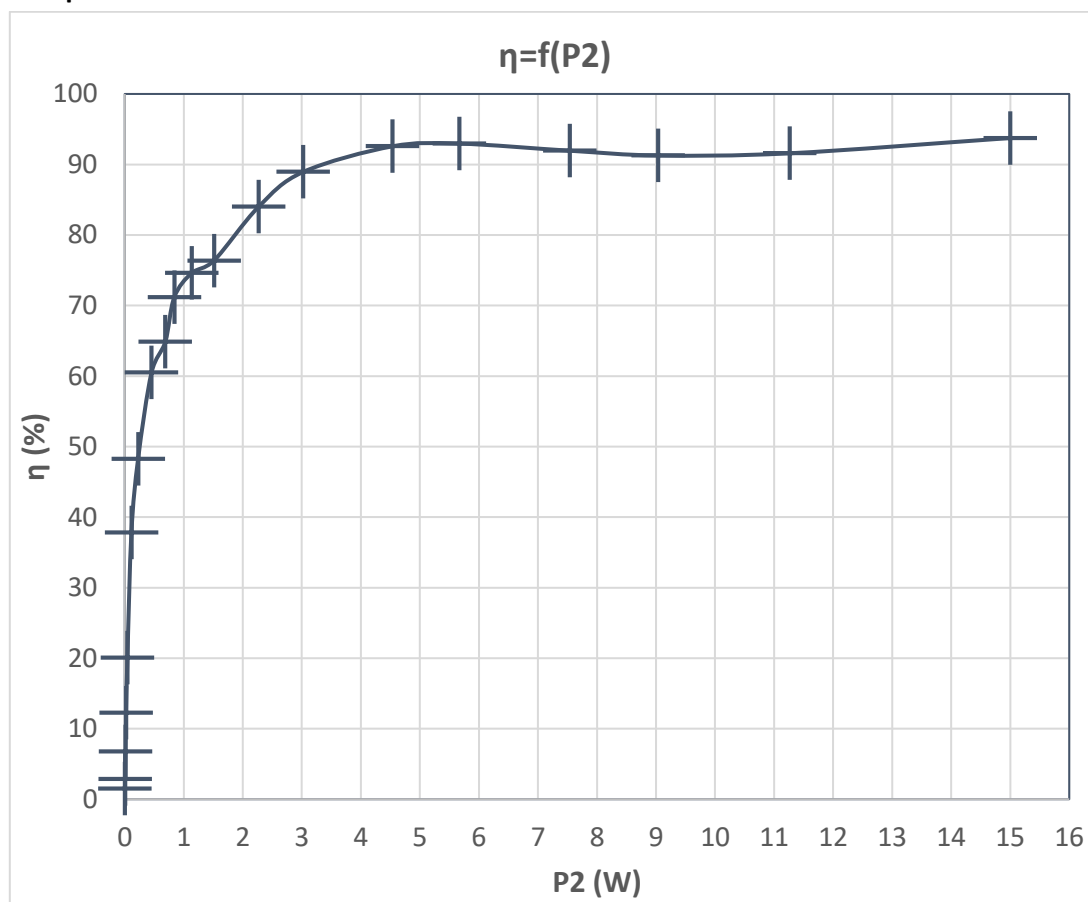
6.2.4 Grafy – zvyšující měnič

Zatěžovací charakteristika při střídě $D=50\%$



Obr. 22 Zatěžovací charakteristika zvyšujícího DC/DC měniče

Účinnost při střídě $D=50\%$



Obr. 23 Graf závislosti účinnosti zvyšujícího DC/DC měniče na výstupním výkonu

6.3.2 Princip funkce realizovaného měniče

Princip funkce časovače v astabilním zapojení a snižujícího měniče byl popsán v kapitolách 1.2 a 4.1. Základem měniče je časovač TLC555 I pracující v astabilním zapojení. Na výstupu časovače je periodicky generován obdélníkový signál s frekvencí a střídou nastavenými rezistory R1 a R2. Tento signál je přiveden do tranzistoru Q1, jenž má funkci budiče a invertoru. Tranzistor Q1 spíná PNP tranzistor Q2 a ten přivádí proud ze zdroje skrze tlumivku do zátěže. I zde je potřeba kontrolovat velikost výstupního napětí. O tuto funkci se starají rezistory R7 a R8 společně s tranzistorem Q3, který vyresetuje výstup časovače a tím zamezí spínání budiče při překročení napětí stanoveného napěťovým děličem.

6.3.3 Volba komponent a výstupního napětí

Tak jako v předcházejícím zapojení je možné tento měnič provozovat i pro větší napětí než napájecí napětí časovače s úpravou stávajícího obvodu.

Realizovaný měnič byl konstruován pro vstupní napětí $U_{IN} = 10 \text{ V}$ a výstupní napětí $U_{OUT} = 5 \text{ V}$. Pro použití kondenzátorů, diody a tlumivky platí podobné podmínky a proto byly použity stejné součástky.

Spínací tranzistor nese označení 2N5401. Jedná se o bipolární PNP tranzistor uložený v pouzdře TO-92. Kvůli tomuto omezení je výkonová ztráta tranzistoru pouze 625 mW. Nejedná se tedy o výkonový tranzistor a pro realizaci měniče s velkým výstupním výkonem není vhodný. Při spínání bipolárních tranzistorů velkou frekvencí navíc vznikají ztráty vlivem komutace kapacity PN přechodu.

Výstupní napětí měniče lze nastavit pomocí děliče napětí skládajícího se z rezistoru R7 a trimru R8, který je připojen na bázi tranzistoru Q3:

$$U_{OUT} = U_{BE} \cdot \frac{R_7 + R_8}{R_8} \quad (16)$$

Předpokládá se výchozí poloha trimru v poloviční poloze:

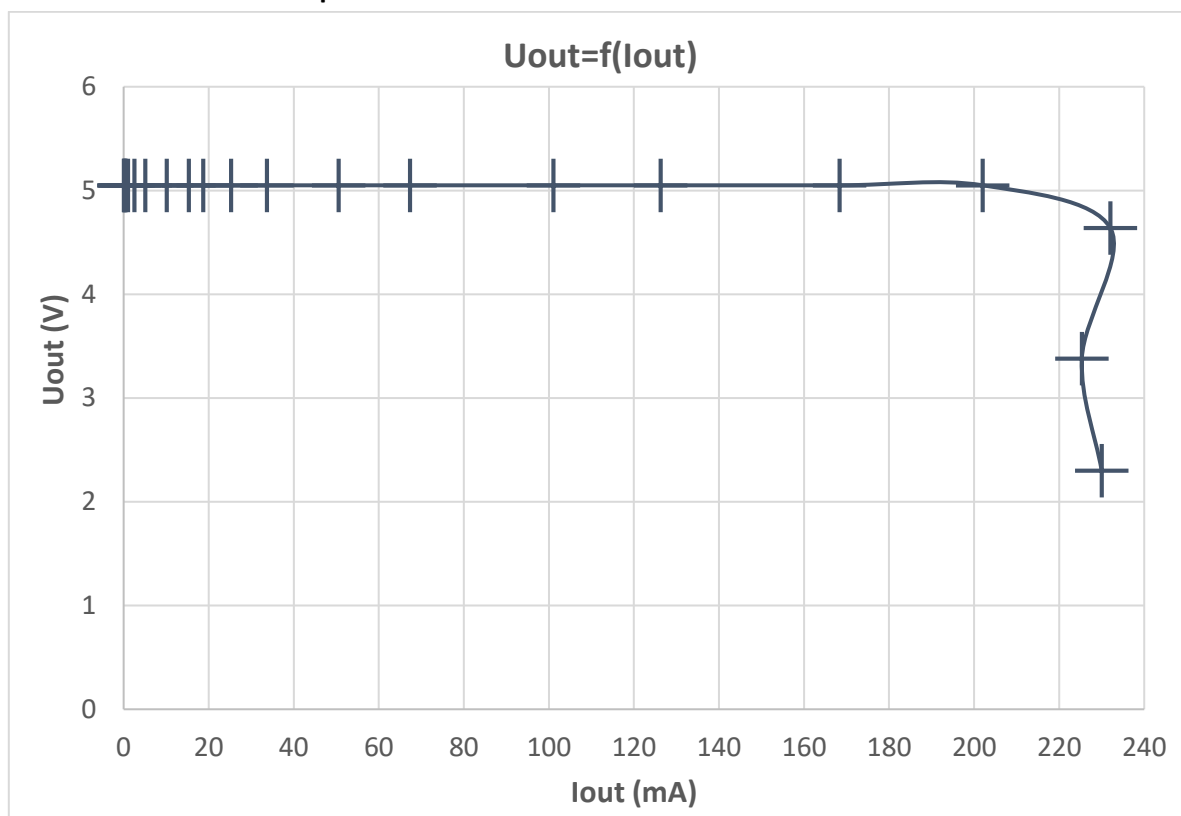
$$U_{OUT} = 0,7 \cdot \frac{4300 + 1000}{1000} = 3,71 \text{ V} \quad (16)$$

Kde U_{BE} je úbytek napětí na přechodu B-E tranzistoru Q3 [U_{BE}] = V,
 R_7 je odpor rezistoru R7 [R_7] = Ω ,
 R_8 je odpor trimru R8 [R_8] = Ω .

Výstupní napětí je dále doladěno na požadovanou hodnotu $U_{OUT} = 5 \text{ V}$ pomocí trimru R8. Jelikož je dělič napětí připojen na výstup měniče, jeho činnost ovlivňuje velikost proudu tlumivkou. Každá aktivace tranzistoru Q3 způsobí proudový pulz rezistorem R7 a přechodem B-E. Tento pulz ovlivní proud tlumivkou a ten poté výstupní napětí. Tato nevýhoda se značně projeví při nezatíženém výstupu a použití nízkého odporu R7. Přijatelnou hodnotou R7 by v tomto zapojení byl rezistor o hodnotě desetinásobku R6. To bohužel ale není možné. Na stávajících hodnotách součástek se tento jev téměř neprojevuje.

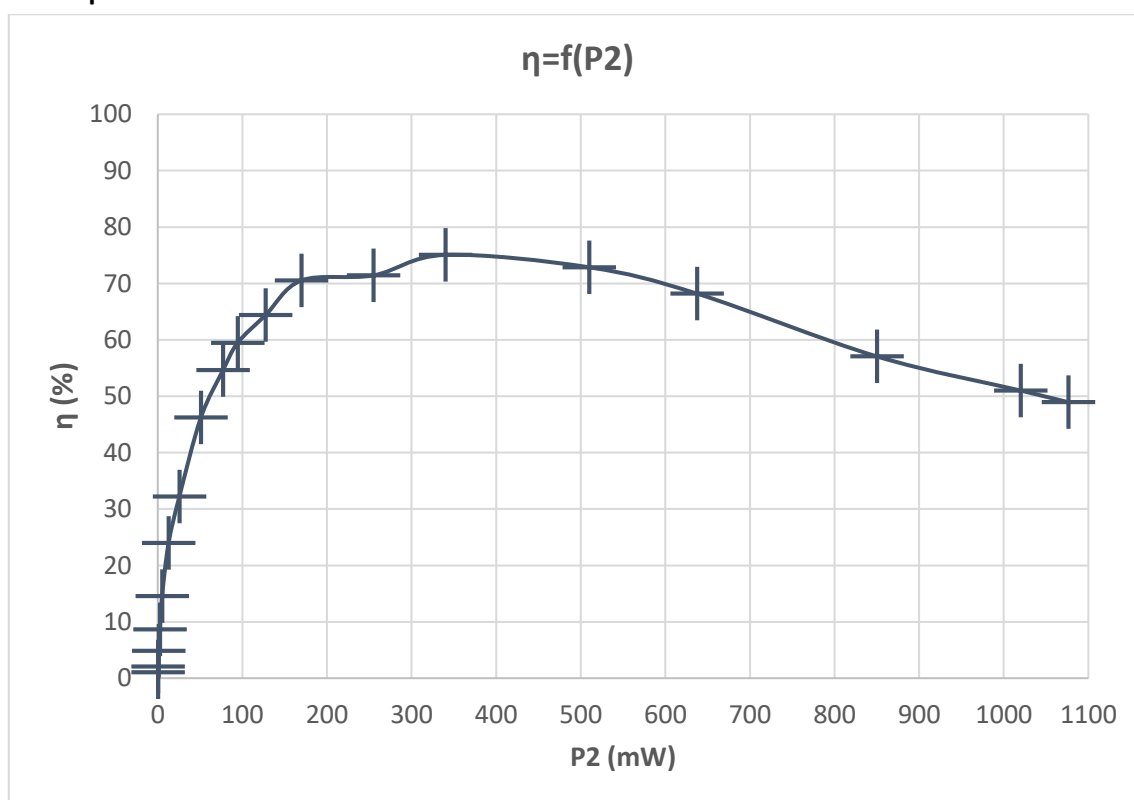
6.3.4 Grafy – snižující měnič

Zatěžovací charakteristika při střídě $D=90\%$



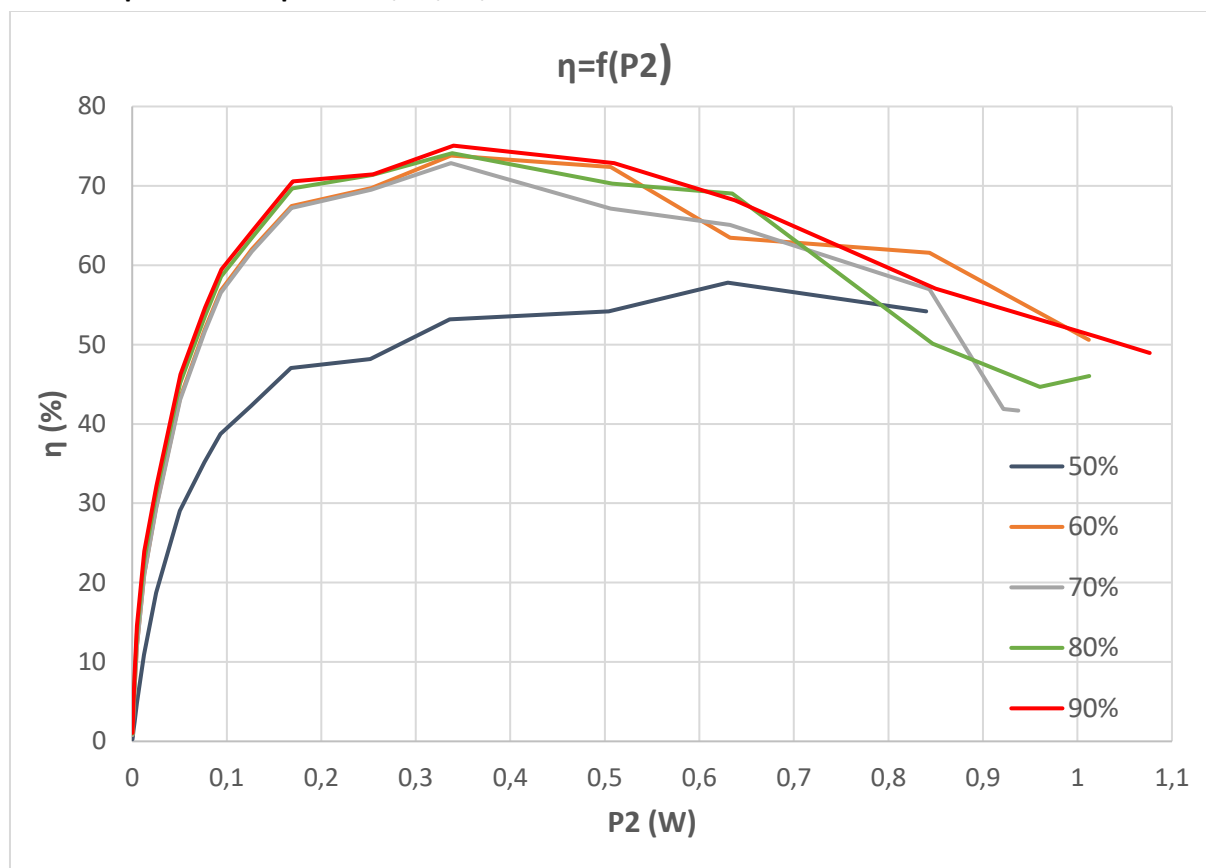
Obr. 25 Zatěžovací charakteristika snižujícího DC/DC měniče

Účinnost při střídě $D=90\%$



Obr. 26 Graf závislosti účinnosti snižujícího DC/DC měniče na výstupním výkonu

Účinnost při střídách spínání 50, 60, 70, 80 a 90%



Obr. 27 Zatěžovací charakteristika snižujícího DC/DC měniče pro různé střídání

6.3.5 Shrnutí dosažených výsledků – snižující měnič

Realizovaný vzorek snižujícího měniče s časovačem 555 funguje dle návrhu. Vstupní napětí o hodnotě 10 V dokáže snížit na 5 V s poměrně velkou přesností a toto nastavené napětí dokáže zachovat i při měnící se zátěži na určitém rozsahu.

Ačkoli byl měnič realizován s výkonově slabým spínacím tranzistorem který způsoboval ztráty, jeho účinnost dosáhla při výstupním výkonu 350 mW hodnoty 75%.

Protože realizovaný snižující měnič pracuje s podstatně nižšími výkony než zvyšující měnič, na Obr. 25 je jasně patrný vliv zvolené střídavy na výstupním napětí. Pokud se pominou ztráty měniče a účinnost, tak při střídě 50% dosahuje výstupní napětí dle vzorce (6) hodnoty 5 V. Při této hodnotě výstupního napětí a střídavy je pak spínání tranzistoru omezovačem ovládáno minimálně, což má za následek neustálý chod spínacího tranzistoru a to způsobuje vyšší ztráty a nižší účinnost. Měnič vykazoval srovnatelnou účinnost se stejnou střídou a frekvencemi 22 a 101 kHz.

Z těchto výsledků lze usoudit, že při návrhu je vhodné použít vyšší střídou než střídou pro žádané napětí. Vzhledem k nízké zatížitelnosti výstupu, má smysl použít měnič pouze v nenáročných aplikacích.

Při pohledu na trh komerčně nabízených měničů se i tato varianta zdá být nepravděpodobná. Většina měničů pro aplikace s nízkou spotřebou obsahuje většinu komponent v integrovaném obvodu. Záměnou spínacího tranzistoru za výkonový by se dalo docílit většího využití.

Závěr

První část této bakalářské práce objasnila vzájemné vlastnosti a odlišnosti časovačů 555. Hlavním charakteristickým rysem bipolárních časovačů je proudová zátížitelnost jejich výstupů. Bipolární časovače jsou schopny zásobovat svou zátěž proudem 200 mA v obou směrech. Další výhodou a zároveň nevýhodou bipolárních časovačů je vlastnost, že jsou jejich vstupy ovládány proudem. Tato vlastnost je výhodná v tom, že pokud je na vstup bipolárního časovače přivedena napěťová špička, nemusí dojít k jeho destrukci. V případě CMOS časovače je destrukce téměř jistá, jelikož dojde k proražení tenké vrstvy oxidu řídících elektrod. Tato vlastnost je zvláště užitečná při spínání indukčnosti. Nevýhodnou vlastností bipolárních časovačů je skutečnost, že jsou ovládány proudem, respektive jejich vstupy potřebují určitý proud aby přešly do opačného – sepnutého stavu. Tímto je značně omezena maximální oscilační frekvence v astabilním režimu a maximální doba překlopení v monostabilním režimu. Jelikož jsou CMOS časovače ovládány polem, tento proud je minimální a dosahují libovolných časových konstant.

V druhé části byly přesně změřeny parametry časovačů na bázi NE555. Měřené bipolární časovače se kromě teplotního rozsahu v ničem nelišily, protože se jednalo o stejný typ časovače. Jediným výsledkem který stojí za zmínku je minimální hodnota napájecího napětí. Časovač SA555P dokázal pracovat až do hodnoty 2,4 V, což je nejspíše výjimka. Je třeba říci, že měření maximální frekvence v astabilním zapojení proběhlo s relativně dobrými výsledky. Nutno však zmínit že se nejedná o maximální frekvenci při které můžou časovače pracovat. Pokud by časovače byly externě napájeny vhodným průběhem, jenž by simuloval nabíjení a vybíjení kondenzátoru (například trojúhelníkový průběh), bipolární časovače by mohly dosáhnout vyšší frekvence spínání. Ze strany CMOS časovačů lze upozornit pouze na nesymetrický průběh trvání nástupné a sestupné hrany výstupního signálu. Zbytek naměřených hodnot se téměř shodoval s katalogovými.

Poslední část této bakalářské práce je zakončena realizací vzorků měničů napětí za použití časovače 555. První realizovaný měnič je zvyšující měnič. Ačkoliv byl měnič realizován s možností manuálně měnit střidu spínání, tato vlastnost se u daného zapojení neukázala jako užitečná. I přes tento malý neúspěch dosahoval navržený zvyšující měnič velmi dobrých výsledků a velmi dobré účinnosti. Svou dobrou efektivitou se může rovnat s některými komerčně dostupnými měniči podobných výkonů. Dá se říci, že účinnosti 90% a více, dosahují jen některé produkty na cenově dostupném trhu. Dalším možným vylepšením měniče může být přesnější návrh obvodových parametrů pro konkrétní zátěž. Jelikož je spotřeba CMOS časovače jakožto řídícího obvodu měniče minimální, dá se dosáhnout zajímavých výsledků.

Dalším realizovaným měničem je snižující měnič. Ačkoli byl měnič realizován s poměrně výkonově slabým spínacím prvkem, na rozsahu který nepřekračuje jeho výkonové omezení se zdá být užitečný. Pokud by byl k tomuto měniči sériově zařazen odpor, který by omezil jeho tepelné namáhání v kritických hodnotách, dal by se použít pro napájení nenáročných aplikací. Při hodnotě výstupního výkonu 350 mW dosahoval účinnosti 75%. Při této hodnotě výkonu je ho vhodné kvůli jeho jednoduchosti a ceně využívat.

Použitá literatura a reference

- [1] HÁJEK, Jan. *2 x Časovač 555*. Praha: BEN, 1998. ISBN 80-86056-27-9.
- [2] LANCASTER, Don. *TTL cookbook*. 7th printing. Indianapolis: Sams, 1974. ISBN 0-672-21035-5.
- [3] LANCASTER, Don. *CMOS Cookbook*. 5th printing. Indianapolis: Sams, 1977. ISBN 0-672-21398-2.
- [4] Charakt.údaje CMOS. LOSÍK, Václav. *269 Integrovaných obvodů*. ul. 26. dubna 208, 725 27 Ostrava: HEL, 1996, s. 208. ISBN 80-902059-1-7.
- [5] Products. *Texas Instruments* [online]. Texas Instruments Incorporated, c1995-2020 [cit. 2020-12-30]. Dostupné z:
- [6] Products. *Maxim Integrated* [online]. Maxim Integrated, c2020 [cit. 2020-12-30]. Dostupné z: https://www.maximintegrated.com/en/products/parametric/search.html?fam=ctr_tim&node=31522&metaTitle=Counters%20and%20Timers%20
- [7] Texas instruments. In: *Katalogový list NE555* [online]. [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <https://www.ti.com/document-viewer/NE555/datasheet/>
- [8] Texas instruments. In: *Katalogový list NE556* [online]. [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ne556.pdf>
- [9] Texas instruments. In: *Katalogový list TLC555-Q1* [online]. [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <https://www.ti.com/document-viewer/TLC555-Q1/datasheet>
- [10] Texas instruments. In: *Katalogový list TLC555 DIE* [online]. [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlc555-die.pdf>
- [11] Texas instruments. In: *Katalogový list LM555* [online]. [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <https://www.ti.com/document-viewer/LM555/datasheet>
- [12] Texas instruments. In: *Katalogový list SE555-SP* [online]. [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/se555-sp.pdf>
- [13] Texas instruments. In: *Katalogový list TLC556M* [online]. [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlc556m.pdf>
- [14] Texas instruments. In: *Katalogový list TLC556* [online]. [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlc556.pdf>
- [15] Texas instruments. In: *Katalogový list TLC555* [online]. [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <https://www.ti.com/document-viewer/TLC555/datasheet/>
- [16] Texas instruments. In: *Katalogový list LMC555* [online]. [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmc555.pdf>
- [17] Texas instruments. In: *Katalogový list LM555QML* [online]. [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm555qml.pdf>
- [18] Maxim Integrated. In: *Katalogový list ICM755x* [online]. [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/ICM7555-ICM7556.pdf>
- [19] ON Semiconductor. In: *Katalogový list MC1455, MC1455B, NCV1455B* [online]. [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/308/MC1455_D-1811178.pdf
- [20] Intersil. In: *Katalogový list ICM7555/PAZ* [online]. [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.312-010.1.pdf>
- [21] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *DC/DC Měniče*. Praha: BEN - technická literatura, 2001. ISBN 978-80-7300-299-2.

- [22] Texas instruments. Basic Calculation of Boost Converter's Power Stage [online]. [cit. 2021-4-21]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/slva372c/slva372c.pdf?>

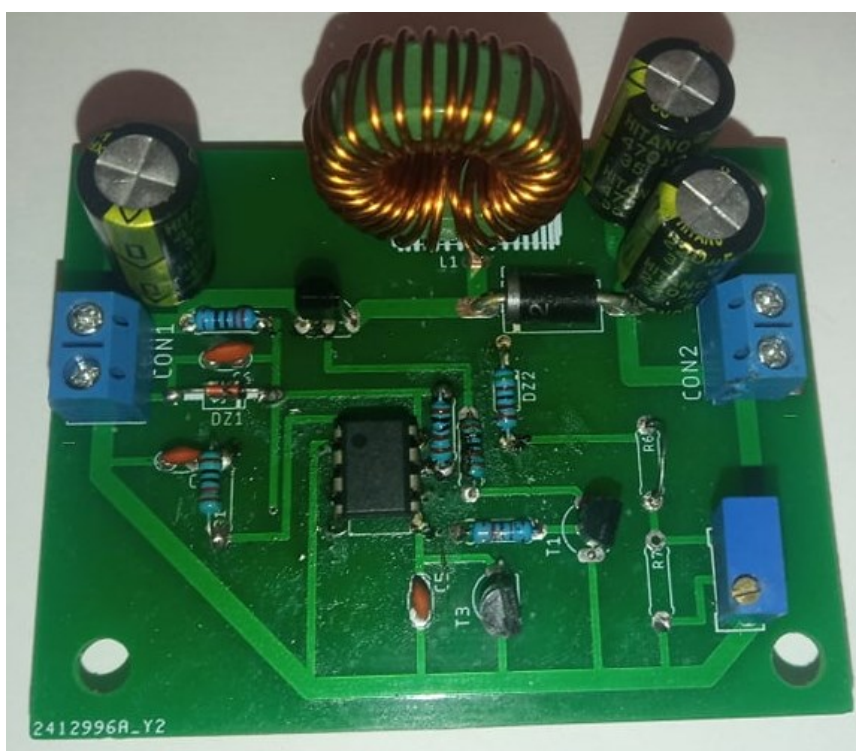
Seznam příloh

- A. Realizované vzorky měničů napětí
- B. Náhled na desky plošných spojů
- C. Naměřené hodnoty pro ověření měničů – část 1
- D. Naměřené hodnoty pro ověření měničů – část 2
- E. Naměřené hodnoty pro ověření měničů – část 3

A. Realizované vzorky měničů napětí



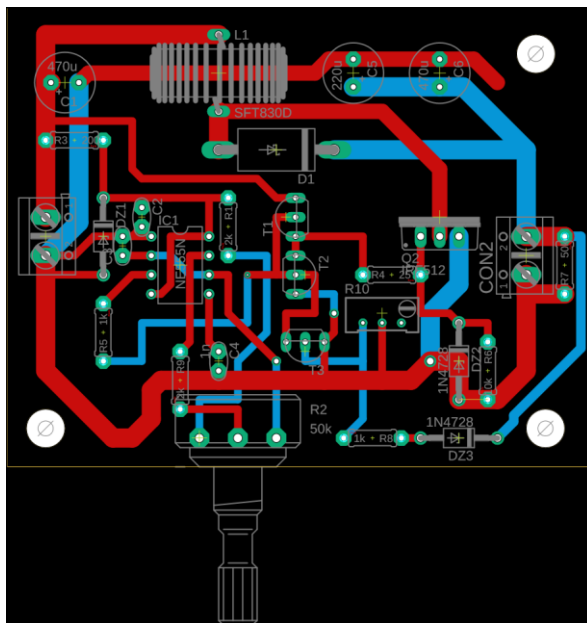
Obr. 27 Realizovaný zvyšující měnič



Obr. 28 Realizovaný snižující měnič

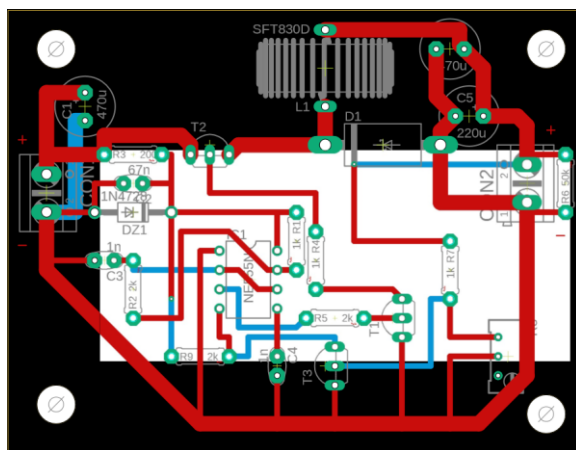
B. Náhled na desky plošných spojů

Skutečné rozměry desky: 7,7x6,1 cm



Obr. 29 Deska plošného spoje zvyšujícího měniče; měřítko 1:1

Skutečné rozměry desky: 7,6x5,85 cm



Obr. 30 Deska plošného spoje snižujícího měniče; měřítko 1:1

C. Naměřené hodnoty pro ověření měničů – část 1

Zvyšující měnič $U_{in} = 10\text{ V}$

Tabulka 14 Naměřené hodnoty pro střidu 50%

U _{out}	R _z (Ω)	I _{in} (mA)	P ₂ (W)	η (%)
15,06	100000	15	0,002268	1,512
15,06	50000	15,8	0,0045361	2,871
15,06	20000	16,8	0,0113402	6,75
15,06	10000	18,5	0,0226804	12,26
15,06	5000	22,6	0,0453607	20,07
15,06	2000	30	0,1134018	37,8
15,06	1000	47	0,2268036	48,26
15,06	500	75	0,4536072	60,48
15,06	330	106	0,6872836	64,84
15,06	270	118	0,8400133	71,19
15,06	200	152	1,134018	74,61
15,06	150	198	1,512024	76,36
15,06	100	270	2,268036	84
15,06	75	340	3,024048	88,94
15,06	50	490	4,536072	92,57
15,06	40	610	5,67009	92,95
15,04	30	820	7,5400533	91,95
15,03	25	990	9,036036	91,27
15,01	20	1230	11,265005	91,59
15	15	1600	15	93,75

Tabulka 15 Naměřené hodnoty pro střidu 60%

U _{out}	R _z (Ω)	I _{in} (mA)	P ₂ (W)	η (%)
15,07	100000	13	0,0023	1,747
15,07	50000	14,3	0,0045	3,176
15,07	20000	15,2	0,0114	7,471
15,07	10000	16,3	0,0227	13,93
15,07	5000	20	0,0454	22,71
15,07	2000	29	0,1136	39,16
15,07	1000	45	0,2271	50,47
15,07	500	75	0,4542	60,56
15,07	330	105	0,6882	65,54
15,07	270	123	0,8411	68,38
15,07	200	153	1,1355	74,22
15,07	150	180	1,514	84,11
15,07	100	260	2,271	87,35
15,07	75	340	3,0281	89,06
15,06	50	500	4,5361	90,72
15,06	40	630	5,6701	90
15,05	30	830	7,5501	90,96
15,04	25	1010	9,0481	89,58
15,04	20	1240	11,31	91,21
15,01	15	1770	15,02	84,86

Tabulka 16 Naměřené hodnoty pro střidu 70%

U _{out}	R _z (Ω)	I _{in} (mA)	P ₂ (W)	η (%)
15,05	100000	14,2	0,002265	1,595088
15,05	50000	14,7	0,00453	3,081667
15,05	20000	16	0,011325	7,078203
15,05	10000	18	0,02265	12,58347
15,05	5000	22,3	0,045301	20,31413
15,05	2000	31	0,113251	36,53266
15,05	1000	48,5	0,226503	46,70155
15,05	500	78	0,453005	58,07756
15,05	330	110	0,686371	62,39738
15,05	270	123	0,838898	68,2031
15,05	200	157	1,132513	72,13455
15,05	150	199	1,510017	75,88023
15,05	100	260	2,265025	87,11635
15,05	75	350	3,020033	86,28667
15,05	50	560	4,53005	80,89375
15,05	40	630	5,662563	89,88194
15,05	30	805	7,550083	93,78986
15,05	25	960	9,0601	94,37604
15,03	20	1370	11,29505	82,44558
15,01	15	1760	15,02001	85,34095

Tabulka 17 Naměřené hodnoty pro střidu 80%

U _{out}	R _z (Ω)	I _{in} (mA)	P ₂ (W)	η (%)
15,07	100000	15	0,00227	1,514032667
15,07	50000	15,2	0,00454	2,988222368
15,07	20000	16	0,01136	7,097028125
15,07	10000	18	0,02271	12,61693889
15,07	5000	22,5	0,04542	20,18710222
15,07	2000	31	0,11355	36,62982258
15,07	1000	48,5	0,2271	46,82575258
15,07	500	78	0,45421	58,23202564
15,07	330	109	0,6882	63,13730887
15,07	270	123	0,84113	68,38449262
15,07	200	159	1,13552	71,41663522
15,06	150	199	1,51202	75,98110553
15,06	100	270	2,26804	84,00133333
15,06	75	350	3,02405	86,40137143
15,05	50	510	4,53005	88,8245098
15,05	40	630	5,66256	89,88194444
15,04	30	840	7,54005	89,76253968
15,03	25	990	9,03604	91,27309091
15,02	20	1270	11,28	88,81905512
15	15	1800	15	83,33333333

D. Naměřené hodnoty pro ověření měničů – část 2

Zvyšující i snižující měnič $U_{in} = 10\text{ V}$

Tabulka 17 Naměřené hodnoty pro střidu 90%

U _{out}	R _z (Ω)	I _{in} (mA)	P ₂ (W)	η (%)
15,08	100000	14,2	0,00227	1,601
15,08	50000	15	0,00455	3,032
15,08	20000	15,8	0,01137	7,196
15,08	10000	17,1	0,02274	13,3
15,08	5000	21	0,04548	21,66
15,08	2000	28,5	0,1137	39,9
15,09	1000	43	0,22771	52,96
15,09	500	70,5	0,45542	64,6
15,09	330	100	0,69002	69
15,09	270	114	0,84336	73,98
15,09	200	147	1,13854	77,45
15,08	150	190	1,51604	79,79
15,09	100	260	2,27708	87,58
15,09	75	360	3,03611	84,34
15,09	50	530	4,55416	85,93
15,08	40	720	5,68516	78,96
15,08	30	900	7,58021	84,22
15,07	25	1060	9,0842	85,7
15,05	20	1310	11,3251	86,45
15,01	15	1990	15,02	75,48

Tabulka 18 Naměřené hodnoty pro střidu 50%

U _{out}	R _z (Ω)	I _{in} (mA)	P ₂ (W)	η (%)
5,02	100000	9,64	0,0003	0,261
5,02	50000	9,68	0,0005	0,521
5,02	20000	9,8	0,0013	1,286
5,02	10000	9,99	0,0025	2,523
5,02	5000	10,37	0,005	4,86
5,02	2000	11,57	0,0126	10,89
5,02	1000	13,47	0,0252	18,71
5,02	500	17,35	0,0504	29,05
5,02	330	21,7	0,0764	35,19
5,02	270	24,1	0,0933	38,73
5,02	200	29,8	0,126	42,28
5,02	150	35,7	0,168	47,06
5,02	100	52,3	0,252	48,18
5,02	75	63,2	0,336	53,17
5,02	50	93	0,504	54,19
5,02	40	109	0,63	57,8
5,02	30	155	0,84	54,19
4,4	25	165	0,7744	46,93
4	20	175	0,8	45,71
3,2	15	185	0,6827	36,9
2	10	190	0,4	21,05

Tabulka 19 Naměřené hodnoty pro střidu 60%

U _{out}	R _z (Ω)	I _{in} (mA)	P ₂ (W)	η (%)
5,03	100000	3,11	0,0003	0,814
5,03	50000	3,18	0,0005	1,591
5,03	20000	3,36	0,0013	3,765
5,03	10000	3,64	0,0025	6,951
5,03	5000	4,2	0,0051	12,05
5,03	2000	6	0,0127	21,08
5,03	1000	8,57	0,0253	29,52
5,03	500	11,69	0,0506	43,29
5,03	330	14,77	0,0767	51,91
5,03	270	16,5	0,0937	56,79
5,03	200	20,4	0,1265	62,01
5,03	150	25	0,1687	67,47
5,03	100	36,3	0,253	69,7
5,03	75	45,7	0,3373	73,82
5,03	50	69,9	0,506	72,39
5,03	40	99,7	0,6325	63,44
5,03	30	137	0,8434	61,56
5,03	25	200	1,012	50,6
4	20	180	0,8	44,44
3,2	15	190	0,6827	35,93
2,1	10	195	0,441	22,62

Tabulka 20 Naměřené hodnoty pro střidu 70%

U _{out}	R _z (Ω)	I _{in} (mA)	P ₂ (W)	η (%)
5,03	100000	3,12	0,0003	0,811
5,03	50000	3,19	0,0005	1,586
5,03	20000	3,37	0,0013	3,754
5,03	10000	3,65	0,0025	6,932
5,03	5000	4,22	0,0051	11,99
5,03	2000	6,02	0,0127	21,01
5,03	1000	8,62	0,0253	29,35
5,03	500	11,75	0,0506	43,07
5,03	330	14,85	0,0767	51,63
5,03	270	16,58	0,0937	56,52
5,03	200	20,5	0,1265	61,71
5,03	150	25,1	0,1687	67,2
5,03	100	36,4	0,253	69,51
5,03	75	46,3	0,3373	72,86
5,03	50	75,4	0,506	67,11
5,03	40	97,2	0,6325	65,07
5,03	30	148	0,8434	56,98
4,8	25	220	0,9216	41,89
4,33	20	225	0,9374	41,66
3,46	15	230	0,7981	34,7
2,6	10	232	0,676	29,14

E. Naměřené hodnoty pro ověření měničů – část 3

Snižující měnič $U_{in} = 10\text{ V}$

Tabulka 21 Naměřené hodnoty pro střidu 80%

U _{out}	R _z (Ω)	I _{in} (mA)	P ₂ (W)	η (%)
5,04	100000	2,66	0,0003	0,955
5,04	50000	2,72	0,0005	1,868
5,04	20000	2,89	0,0013	4,395
5,04	10000	3,19	0,0025	7,963
5,04	5000	3,75	0,0051	13,55
5,04	2000	5,56	0,0127	22,84
5,04	1000	8,15	0,0254	31,17
5,04	500	11,25	0,0508	45,16
5,04	330	14,36	0,077	53,6
5,04	270	16,06	0,0941	58,58
5,04	200	20	0,127	63,5
5,04	150	24,3	0,1693	69,69
5,04	100	35,6	0,254	71,35
5,04	75	45,7	0,3387	74,11
5,04	50	72,3	0,508	70,27
5,04	40	92	0,635	69,03
5,04	30	169	0,8467	50,1
4,9	25	215	0,9604	44,67
4,5	20	220	1,0125	46,02
2,75	15	235	0,5042	21,45
2,5	10	240	0,625	26,04

Tabulka 22 Naměřené hodnoty pro střidu 90%

U _{out}	R _z (Ω)	I _{in} (mA)	P ₂ (W)	η (%)
5,05	100000	2,4	0,0003	1,063
5,05	50000	2,46	0,0005	2,073
5,05	20000	2,64	0,0013	4,83
5,05	10000	2,94	0,0026	8,674
5,05	5000	3,5	0,0051	14,57
5,05	2000	5,32	0,0128	23,97
5,05	1000	7,92	0,0255	32,2
5,05	500	11,03	0,051	46,24
5,05	330	14,14	0,0773	54,65
5,05	270	15,88	0,0945	59,48
5,05	200	19,8	0,1275	64,4
5,05	150	24,1	0,17	70,55
5,05	100	35,7	0,255	71,44
5,05	75	45,3	0,34	75,06
5,05	50	70	0,5101	72,86
5,05	40	93,5	0,6376	68,19
5,05	30	149	0,8501	57,05
5,05	25	200	1,0201	51,01
4,64	20	220	1,0765	48,93
3,38	15	225	0,7616	33,85
2,3	10	235	0,529	22,51